รายงานการวิจัย

คอนกรีตกำลังสูงผสมฝุ่นหินผุ

High Strength Concrete Using Decomposed-Rock Dust

ชูเกียรติ ชูสกุล Chookiat Choosakul

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2556

คอนกรีตกำลังสูงผสมฝุ่นหินผุ

ชูเกียรติ ชูสกุล

บทคัดย่อ

การศึกษาการนำฝุ่นหินผุเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในงานคอนกรีตกำลังสูง เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.36 และออกแบบค่ากำลังอัดที่ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผสมฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้สารผสมเพิ่ม Type A&F ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการเทได้จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณฝุ่นหินผุที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด การทดแทนที่ฝุ่นหินผุเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง แสดงให้เห็นว่าการใช้ฝุ่นหินผุในงานคอนกรีตกำลังสูงจะทำให้น้ำหนักของคอนกรีตต่ำ

คำสำคัญ: คอนกรีตกำลังสูง ฝุ่นหินผุ กำลังอัด ปอซโซลานธรรมชาติ

High Strength Concrete Using Decomposed-Stone Dust

Chookiat Choosakul

Abstract

Study on the use of decomposed-rock dust substitution for Portland cement type 1 in high strength concrete on the compressive strength was tested. The ratio of water to binder (W/B) was 0.36 with the compression design at 500 kg/cm^2. Decomposed-rock dust was replaced at 10%, 15%, and 20% by the weight of the binder and the admixtures Type A&F was added. The compressive strength was tested at 1, 7 and 28 days. The result revealed that the workability was increased with increasing the proportion of decomposed-rock dust. The highest compressive strength was found at 10% replacement rate. Increasing the substitution rate of decomposed-rock dust was decreased the concrete density. The result indicated that low concrete weight of high strength concrete in high substitution rate of decomposed-rock dust

Keywords: High Strength Concrete, Decomposed-Rock Dust, Compressive Strength, Natural Pozzolan

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “คอนกรีตกำลังสูงผสมฝุ่นหินผุ” ได้รับการสนับสนุนงบประมาณทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ปีงบประมาณ ๒๕๕๖

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ นายชรินทร์ นวลแก้ว และนายเกียรติศักดิ์ ร่มเย็น ที่ได้ร่วมมือในการเก็บข้อมูลและทดสอบ สุดท้ายต้องขอขอบคุณ คุณศุภวัฒน์ จันทร์ปราง และสาขาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

นายชูเกียรติ ชูสกุล

หัวหน้าโครงการวิจัย

มกราคม ๒๕๖๐

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและการนำโครงการวิจัยไปใช้ประโยชน์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คอนกรีตกำลังสูง	5
2.2 คอนกรีตกำลังสูงและสูงมาก	8
2.3 วัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง	9
2.4 กำลังอัดคอนกรีต	20
2.5 การออกแบบคอนกรีตกำลังสูง	21
2.6 อายุที่ใช้ทดสอบคอนกรีตกำลังสูง	26
2.7 ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำ	27
2.8 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 เตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	31
3.2 ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ทดสอบคุณสมบัติฝุ่นหินผุ	32
3.4 ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม	33
3.5 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง	35
3.6 ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง	36
3.7 การถอดแบบและบ่มคอนกรีต	37
3.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	37
บทที่ 4 สรุปผลการทดสอบ วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ	
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินผุ	39
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม	40
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด	41
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	42
4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	44
4.6 สรุปผลการทดสอบ	45
4.7 ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก ผลลัพธ์ (OUTPUT) ที่ได้จากโครงการวิจัย	51

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 อนุภาคของฝุ่นหินผุ ขยาย 1000 เท่า	19
4.1 การเปรียบเทียบลักษณะสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับหินผุก่อนที่จะนำมาบดและลักษณะสีของหินผุที่บดเป็นฝุ่นหินผุแล้ว	39
4.2 แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นระหว่างปริมาณฝุ่นหินผุกับอายุของคอนกรีต	43
4.3 แสดงการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตระหว่างปริมาณฝุ่นหินผุกับอายุของคอนกรีต	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการจำแนกชั้นของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618-99	13
2.2 ปริมาณองค์ประกอบในโครงสร้างทางแร่ของหินผุ	16
2.3 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในโครงสร้างของหินผุ	18
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และฝุ่นหินผุ	20
2.5 ค่ายุบตัวที่แนะนำในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูง	22
2.6 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ	22
2.7 อัตราส่วนปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรของคอนกรีต	23
2.8 ปริมาณน้ำและฟองอากาศ	23
2.9 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	24
2.10ปริมาณเถ้าถ่านหินที่ใช้แทนปูนซีเมนต์	25
3.1 ผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต	36
4.1 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์และฝุ่นหินผุ	40
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด	40
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ	41
4.4 ผลการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต	41
4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน	42
4.6 ผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน	44

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

คอนกรีตกำลังสูงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง งานก่อสร้างสมัยใหม่ต้องการคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตเป็นพิเศษ เช่น อาคารสูง ทางด่วน สะพาน เนื่องจากทำให้ขนาดขององค์อาคารมีขนาดเล็กลงในขณะที่รับแรงได้เท่าเดิม ตลอดจนน้ำหนักของชิ้นส่วนและโครงสร้างลดลงนอกจากนี้คอนกรีตกำลังสูงยังมีคุณสมบัติในการแน่นทึบของตัวคอนกรีต มีความทนทานสูง ความต้านทานต่อการสึกกร่อนสูงโมดูลัสแตกร้าวสูง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น คือ สามารถถอดแบบหล่อคอนกรีตได้เร็ว ทำให้สามารถใช้แบบหล่อได้มากครั้งขึ้น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงเฉือน และโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ซึ่งทำให้มีการหดตัวน้อยลง โดยทั่วไปคอนกรีตกำลังสูงที่มีค่าการยุบตัวน้อยมากหรือไม่มีการยุบตัวเลย (No slump Concrete)

วิทยาการคอนกรีตเทคโนโลยีได้พัฒนาไปมาก มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม เช่น สารเร่งการก่อตัว (Accelerating admixtures) สารเพิ่มความไหลลื่นสูง (Superplasticizer) โดยช่วยลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และทำให้ความสามารถในการเทคอนกรีตมีประสิทธิภาพขึ้น การใช้สารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณภาพกำลังสูงขึ้น ในการลดปริมาณน้ำ การใช้เถ้าลอย (Fly Ash) ขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) ซิลิกาฟูม (Silica Fume) เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) และวัสดุปอซโซลานอื่นๆ เพื่อเพิ่มกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีตให้สูงขึ้น

ฝุ่นหินผุได้มาจากการนำหินผุมาบดให้ละเอียดซึ่งจะมีคุณสมบัติที่มีสารปอซโซลาน (ชูเกียรติ ชูสกุล, 2553) หินผุจากการสำรวจจากบ่อหินต่างๆ ในอำเภอกาญจนดิษฐ์ พบว่ามีบ่อหินผุอยู่หลายแห่ง ซึ่งมีแนวคิดที่จะศึกษาการเกี่ยวกับการนำฝุ่นหินผุมาทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลงในสัดส่วนที่พอเหมาะ เพื่อจะเป็นแนวทางในการพิจารณาใช้ฝุ่นหินผุที่ได้บดละเอียดแล้วทำให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีตามความต้องการที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตให้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่จะใช้งานต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาในคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีฝุ่นจากหินผุบดละเอียดเป็นส่วนผสม ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาการ

ตัดสินใจเลือกส่วนผสมของฝุ่นจากหินผุบดละเอียดในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ประโยชน์และการนำไปใช้ในอนาคตให้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่จะใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะทำคอนกรีตกำลังสูงให้ได้กำลังอัดถึง 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน โดยจะลดปริมาณปูนซีเมนต์โดยใช้สารประกอบปอซโซลานชนิดใช้ฝุ่นหินผุในการทดแทนปูนซีเมนต์ บางส่วนผสมสารเคมีผสมเพิ่มประเภท A (สารลดน้ำ) และสารเคมีผสมเพิ่มประเภท F (สารลดน้ำพิเศษ)

1.2.2 เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะทำคอนกรีตให้ได้กำลังอัดถึง 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน

1.2.3 เพื่อศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2514/2517 ประเภทที่1และมาตรฐาน ASTM (150-71 Type 1)

1.3.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Matetial) เป็นฝุ่นหินผุที่ได้จากบ่อหินในอำเภอกาญจนดิษฐ์ นำหินผุมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Los Angeles ความละเอียดค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5

1.3.3 สารเคมีผสมเพิ่ม (Concrete Admixture) ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducers หรือ Plasticizers) ประเภท F สารลดน้ำระดับสูง (High Range Water Reducing Admixtures หรือ Superplasticizer) อย่างน้อยร้อยละ 12 โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม

1.3.4 โดยศึกษาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับอัตราฝุ่นหินผุที่นำมาทดแทนปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนต่อไปนี้โดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 85:15 และ 80:20

1.3.5 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงให้ได้กำลังอัด 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แบบเป็นทรงกระบอก ที่อายุ 28 วัน

1.3.6 ทำการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อครบอายุ 1,7 และ 28 วัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินผุ

1.4.3 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานด้านวิศวกรรมของมวลรวม

1.4.3.1 ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำและความชื้นผิว

1.4.3.2 การขัดสีของมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่องลอสแองเจิลลิส

1.4.3.3 ขนาดคละ และโมดูลัสความละเอียด

1.4.3.4 หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง

1.4.4 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 211.4R

1.4.5 หล่อคอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้

1.4.6 ทดสอบการต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

1.4.7. วิเคราะห์ผลการศึกษา

1.4.8. สรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและการนำโครงการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.5.1 คอนกรีตกำลังอัดสูงที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ได้กำลังอัด 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน

1.5.2. ลดใช้ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้

1.5.3. ได้ใช้ประโยชน์จากหินผุได้มากที่สุด

1.5.4. ทราบสัดส่วนที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

บทที่ 2
ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีตกำลังสูง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552 กล่าวว่า คอนกรีตกำลังสูงมีบทบาทในวงการก่อสร้างของประเทศไทยเมื่อไม่นานมานี้ ตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2530 เป็นต้นมาการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วทำให้ที่ดินมีราคาสูงขึ้นมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จึงนิยมก่อสร้างอาคารสูงและใช้คอนกรีตกำลังสูงสำหรับเทเสาของอาคาร คอนกรีตกำลังสูงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่สำหรับวิศวกรของไทย แต่ในต่างประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศแถบยุโรป ญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกาได้มีการศึกษาเรื่องคอนกรีตกำลังสูงมาพอสมควร

การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงเริ่มขึ้นในสหรัฐอเมริกาในช่วงปี พุทธศักราช 2493 ในขณะนั้นถือว่าคอนกรีตมีกำลังสูงเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานสูงกว่า 340 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังปี พุทธศักราช 2503 จึงมีการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงช่วง 410 ถึง 520 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อใช้ในการก่อสร้างอาคาร และในต้นทศวรรษต่อมาสามารถพัฒนาคอนกรีตกำลังอัดสูงถึง 620 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในปัจจุบันนี้วิทยาการคอนกรีตเทคโนโลยีได้พัฒนาไปมาก มีการใช้สารเคมีในการลดปริมาณน้ำเพื่อให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง มีการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มกำลังอัดประลัยและความทนทานของคอนกรีตให้สูงขึ้น ดังนั้นการทำคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 1100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงเป็นเรื่องที่สามารถทำได้ไม่ยากนัก สมาคมคอนกรีตของอเมริกาได้กำหนดให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดมากกว่า 410 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นคอนกรีตกำลังสูง

คำนิยามของคอนกรีตกำลังสูงในแต่ละประเทศจะมีความแตกต่างกัน สำหรับในประเทศไทยเราสามารถแบ่งชั้นกำลังอัดของคอนกรีตได้ดังนี้

- คอนกรีตกำลังอัดต่ำ กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์น้อยกว่า 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- คอนกรีตกำลังอัดปานกลาง กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ 240-400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

- คอนกรีตกำลังอัดสูง กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ 400-500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- คอนกรีตกำลังอัดสูงมาก กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์มากกว่า 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

คอนกรีตกำลังอัดสูงมาก เป็นคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวเกาะประสาน ทำได้โดยการลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้น้อยลง ซึ่งเป็นผลให้ความสามารถในการเทลดลง จึงจำเป็นต้องผสมสารเคมีเพิ่มประเภทที่ให้ความหล่อลื่นสูง (SuperPlasticizer) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเทให้สูงขึ้น โดยคุณภาพของวัสดุและส่วนผสมต่างๆ ต้องควบคุมอย่างละเอียด

คุณสมบัติคอนกรีตกำลังสูง นอกจากคอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดได้สูง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังรับแรงดึงก็สูงขึ้นการล้าของคอนกรีตน้อยลงมีความทนทานและต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวในช่วงอิลาสติกก็เพิ่มมากขึ้น แต่หน่วยการหดตัวที่กำลังประลัยมีค่าลดลง สมมุติฐานคำนวณการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตกำลังสูงอาจต้องปรับปรุงบ้างในบางส่วน อย่างไรก็ดีอาจใช้สมมุติฐานเดิมคำนวณได้ซึ่งยังให้ความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การที่จะออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังมากกว่า 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะต้องควบคุมอัตราของน้ำต่อซีเมนต์ให้มากกว่า 0.45 โดยน้ำหนักและเพื่อสะดวกในการเท ส่วนยุบตัวจะมีค่าระหว่าง 5 เซนติเมตร ถึง 10 เซนติเมตร ปริมาณซีเมนต์ที่จะใช้เท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร โดยที่ความเครียดเนื่องจากการคืบและการหดตัวมีค่ามากขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์ ดังนั้นการให้ส่วนผสมคอนกรีตที่แห้งและใช้ซีเมนต์น้อยลง และเติมสารผสมเพิ่ม จะช่วยลดปริมาณการคืบและการหดตัว

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตกำลังสูง ตลอดจนขั้นตอนการเทจะต้องเข้มงวด และมีการควบคุมอย่างสม่ำเสมอในสนามทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนต่างๆ ขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงจะเกิดหน่วยแรงในช่วงถ่ายแรงและสภาวะใช้งาน เช่น ที่หน้าตัดกึ่งกลางคานในขณะถ่ายแรง แรงอัดผิวล่างของคานจะเกิดหน่วยแรงอัดในขณะที่ผิวบนจะเกิดหน่วยแรงดึง แต่ในสภาวะใช้งานเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกปกติกระทำ หน่วยแรงดึงจะเกิดขึ้นที่ผิวล่าง และที่ผิวบนจะเกิดแรงอัด สำหรับส่วนปลายขององค์อาคารขณะถ่ายแรงจะเกิดหน่วยแรงแบกทานหรือหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่มีค่าสูง

ดังนั้นการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างงานคอนกรีตอัดแรงจะต้องเข้มงวดกว่างานคอนกรีตเสริมเหล็ก

กำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยกำลังของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และDegree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่อย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณกำลัง ลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อคอนกรีตไม่มากนักการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

หลังการหล่อคอนกรีตจะพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength of concrete) จะเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยอัตราการเพิ่มกำลังมีค่ามากในช่วงแรก (หลังการเทคอนกรีต) และค่อยๆ ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับวิธีการบ่ม และชนิดของซีเมนต์ที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงการเพิ่มกำลังคอนกรีตได้เร็วๆ เป็นสิ่งที่ต้องการเพื่อทำการอัดแรงให้เร็วที่สุดเท่าที่ทำได้ ทำให้ผลิตชิ้นงานได้เร็วขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนนิยมใช้การบ่มด้วยไอน้ำ หรือบางทีก็ใช้ซีเมนต์ประเภทที่สามซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในช่วงเวลาสั้นๆ หลังจากเริ่มเทคอนกรีต

สารผสมคอนกรีตลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Admixture) หรือสารเพิ่มความลื่น (Plasticizer Admixture) ที่มีสารประกอบหลักพวกไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คาร์บอกซีลิก (Carboxylic) ช่วยลดปริมาณน้ำได้ประมาณร้อยละ 5-45 และสามารถเพิ่มความไหลลื่นในการเทเมื่อใช้ในอัตรามากกว่าผู้ผลิตแนะนำจะทำให้คอนกรีตกำลังลดลง ในอายุเริ่มแรกแต่เมื่อมีอายุนานไปจะไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต

การใช้สารผสมให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้นควรจะเติมสารผสมลงในคอนกรีตภายหลังจากซีเมนต์ผสมกับน้ำแล้ว การใช้สารผสมคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพจากการแนะนำของผู้ผลิต จะสามารถลดน้ำได้ถึงร้อยละ 10 กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 25 ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

2.2 คอนกรีตกำลังสูงและสูงมาก (High and Very Strength Concrete)

ในประเทศไทย ได้มีการใช้คอนกรีตกลังอัดสูงมาอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากเนื้อคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ใช้ในระยะแรกแห้งมีค่ายุบตัวน้อยมากหรือไม่มีการยุบตัวเลย (No Slump Concrete) จึงทำให้ไม่สามารถจัดส่งไปในโครงสร้าง ณ หน่วยงานก่อสร้างได้ ดังนั้นเท่าที่ผ่านมาคอนกรีตกำลังอัดสูงจึงถูกจำกัดการใช้งานเฉพาะในโรงผลิตเสาเข็ม คานสะพาน พื้นสำเร็จเท่านั้น

จนกระทั่งในปัจจุบัน จากการวิจัย ค้นคว้า และปรับปรุงส่วนผสมต่างๆ ทำให้คอนกรีตกำลังอัดสูง มีความก้าวหน้าขึ้นอีกขั้น ซึ่งนอกจากจะมีกำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นแล้วเนื้อคอนกรีตยังมีความเหลวมากขึ้นอีกด้วย กล่าวคือมีการยุบตัวสูงมากกว่า 15 เซนติเมตร ทำให้สามารถลำเลียงโดยรถผสมคอนกรีตไปใช้ ณ หน่วยงานก่อสร้างทั่วไป รวมทั้งสามารถลำเลียงคอนกรีตเข้าสู่แบบหล่อด้วยคอนกรีตปั๊มได้อย่างสะดวก อันเป็นผลทำให้คอนกรีตกำลังอัดสูงเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการก่อสร้างอาคารสูงในประเทศไทย

2.2 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตกำลังอัดสูง และสูงมาก

คอนกรีตกำลังอัดสูง และสูงมากมีสัดส่วนการผสมที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณไม่เกิน 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. ทราย จะคัดเลือกทรายแม่น้ำที่มีความสะอาด และมีความหยาบมากกว่าปกติโดยมีค่า Fineness Modulus (F.M.) อยู่ในช่วง 3.0-3.2 เพื่อลดน้ำในส่วนผสม

3. หิน ที่นำมาใช้ควรเลือกสรรจากแหล่งที่มีคุณภาพและถูกกำหนดให้มีขนาดเล็กกว่าปกติ เพื่อลดการแตกร้าวในเนื้อหิน (Micro crack) โดยกำหนดให้ใช้หินขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน ¾ นิ้ว (20 มิลลิเมตร) ในคอนกรีตกำลังอัดสูง และไม่เกิน ⅜ นิ้ว (10 มิลลิเมตร) ในคอนกรีตกำลังอัดสูงมาก

4. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คอนกรีตกำลังอัดสูงมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 0.30

5. น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทต่างๆ

5.1 น้ำยาลดน้ำและยืดเวลาแข็งตัวเพื่อลดปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตให้ใช้น้อยที่สุดซึ่งมีผลโดยตรงกับการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต

5.2 น้ำยาลดน้ำจำนวนมาก (Super plasticizer) เพื่อลดน้ำในส่วนผสมลงอีกประมาณร้อยละ 15-30 โดยที่ยังคงค่ายุบตัวของเนื้อคอนกรีตสดไว้ในระดับที่สูงกว่า 15 เซนติเมตร

6. วัสดุผสมอื่นๆ

2.3 วัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง

วัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม น้ำ และสารลดปริมาณน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticcizer) นอกจากนี้นิยมผสมวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน หรือซิลิกาฟูม เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน และเพิ่มกำลังอัดประลัยของคอนกรีตให้สูงขึ้น

2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทำคอนกรรีตกำลังสูงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และไม่นิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ยกเว้นกรณีที่ต้องการกำลังอัดในช่วงอายุต้นสูง เช่น พวกคอนกรีตอัดแรง เพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีราคาสูงจึงทำให้คอนกรีตมีราคาสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 จะทำให้คอนกรีตมีความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงในช่วงอายุต้น ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงจะค่อนข้างสูงระหว่าง 400 ถึง 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งทำให้เกิดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมาก ดังนั้นอาจเลือกใช้ปูนซีเมนต์ความร้อนต่ำหรือใช้วัสดุปอซโซลานแทนปูนซีเมนต์มากขึ้น ทั้งนี้ต้องแน่ใจว่ากำลังอัดและคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีตกำลังสูงยังคงเป็นไปตามที่ต้องการ

2.3.2 มวลรวมละเอียด

ทรายเป็นส่วนผสมที่สำคัญในคอนกรีตกำลังสูง และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมากกว่าหิน การทำคอนกรีตกำลังสูงควรใช้ทรายที่สะอาด เม็ดกลม ผิวเรียบ และมีขนาดคละที่ดี เพราะจะทำให้ส่วนผสมคอนกรีตต้องการน้ำต่ำลง ทรายที่มีขนาดคละดีจะให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น การใช้ทรายที่ละเอียดจะทำให้ส่วนผสมเหนียว เทและเขย่าเข้าแบบได้ยาก โดยเฉพาะการใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำกว่า 2.5 เพราะส่วนผสม

ของคอนกรีตกำลังสูงมักมีปริมาณของส่วนละเอียดคือปูนซีเมนต์สูงอยู่แล้ว ACI 363 แนะนำให้ใช้ทรายหยาบโดยปริมาณที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 ต่ำ แต่ยังคงให้เป็นไปตามข้อกำหนด ASTM C33 จะทำให้เทได้ง่ายขึ้นและให้กำลังอัดของคอนกรีตที่ดี

2.3.3 มวลรวมหยาบ

หินที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงควรเป็นหินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน ½ นิ้ว หรือขนาด ⅜ นิ้ว เพราะการใช้หินเล็กจะมีพื้นที่ผิวของหินมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างหินและซีเมนต์เพสต์ การใช้หินที่มีขนาด 3 นิ้ว จะให้แรงยึดเหนี่ยวเพียงร้อยละ 10 ของหินขนาด ½ นิ้ว นอกจากนี้เมื่อคอนกรีตรับแรงหินที่เล็กกว่าสามารถกระขายแรงให้แก่หินก้อนอื่นๆ ได้สม่ำเสมอกว่าการใช้หินก้อนใหญ่ การใช้หินย่อยสามารถรับแรงได้ดีกว่ากรวดเพราะกรวดมีรูปร่างกลมและผิวเรียบ ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของกรวดกับซีเมนต์เพสต์จึงมีค่าต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตรับแรงได้ต่ำตามไปด้วย แต่การใช้หินที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมากเกินไปหรือมีรูปร่างแบนยาวจะให้ผลทางด้านลบ เพราะต้องใช้น้ำในส่วนผสมมากขึ้นเพื่อให้ได้ความสามารถในการเทได้ที่เท่ากัน ลักษณะของหินที่ดีจึงควรสะอาด ความแข็งแกร่งสูง มีเหลี่ยมและมุม รูพรุนน้อย ไม่มีรูปร่างแบนหรือยาวหรือมีค่อนข้างน้อย

2.3.4 น้ำ

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตกำลังสูงควรเป็นน้ำสะอาด ในกรณีที่สงสัยว่าน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตไม่สะอาดควรทำการทดสอบให้แน่ใจก่อนนำไปใช้งาน โดยนำน้ำที่สงสัยไปผสมมอร์ตาร์และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน จากนั้นเปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้น้ำกลั่นในการผสม หากว่าน้ำที่สงสัยสามารถให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของมอร์ตาร์ที่ใช้น้ำกลั่นผสม ถือได้ว่าน้ำนั้นสามารถนำมาผสมคอนกรีตกำลังสูงได้

2.3.5 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มมีมากมายหลายชนิด บางชนิดก็เป็นที่นิยมใช้กันในช่วงระยะหนึ่งเท่านั้น อาจจำแนกสารผสมเพิ่มหลักๆ ออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. สารเพิ่มฟองอากาศ (Air-Entraining Admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C 260 ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำ ช่วยเพิ่มปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต ได้แก่ สารกระจายกักฟองอากาศ

2. สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C 494 ซึ่งเป็นสารประกอบเคมีที่ละลายน้ำ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตสด ได้แก่ สารลดปริมาณน้ำ สารหน่วงการก่อตัว สารเร่งการก่อตัว สารลดปริมาณน้ำและเร่งหรือหน่วงการก่อตัว สารลดปริมาณน้ำในอัตราสูงและหน่วงการก่อตัว

3. สารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral Admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งเป็นวัสดุผงละเอียด เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว อาจเรียกสารผสมนี้ว่า วัสดุผสมเพิ่ม เนื่องจากใช้ช่วยปรับส่วนขนาดคละของวัสดุผสมให้ดีขึ้น และยังช่วยปรับส่วนขนาดคละของวัสดุผสมให้ดีขึ้น และยังช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้บางส่วน สารผสมนี้อาจทำหรือไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซีเมนต์เพส ได้แก่ วัสดุแร่ธาตุเฉื่อย วัสดุปอซโซลาน ซิลิก้าฟูม

4. สารผสมเพิ่มอื่น ๆ (Miscellaneous Admixtures) เป็นสารผสมเพิ่มที่ยังไม่จัดอยู่ในมาตรฐานของ ASTM ได้แก่ สารเพิ่มการยึดเหนี่ยว (Bonding Agent) สารลดการกัดกร่อน (Corrosion Agent) สารเพิ่มการขยายตัว (Expanding Agent) สารกันซึม (Waterproofing Agent) ฯลฯ สารลดปริมาณน้ำ (Water – reducing Admixtures)

สารลดน้ำ (Water-Reducing Admixtures)

สารชนิดนี้รู้จักกันดีในชื่อ Plasticizer ช่วยลดปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต (ประมาณร้อยละ 5-10) เพื่อให้ได้ความข้นเหลวเท่าๆ กัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา หรืออาจกล่าวว่าสารชนิดนี้จะเพิ่มความเหลว และความยุบตัวของคอนกรีตช่วยให้มีความสามารถเทได้ดีขึ้นเมื่อใช้น้ำในส่วนผสมน้อยลงจึงมีผลในทางเพิ่มกำลังของคอนกรีต (ประมาณร้อยละ 10-20)โดยไม่ต้องเพิ่มปูนซีเมนต์ ลดการแยกตัวและสูญเสียน้ำ เพิ่มความแน่นทึบน้ำและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมสารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ทำมาจากกรดหรือเกลือลิกโนซัลโฟนิค (Lignosulphonic) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมทำเยื่อไม้ (wood pulp industry) เกลือของกรดไฮดรอกซิเลตคาร์บอไซลิค (Hydroxyl Ted Carboxylic Acid) ซึ่งใช้ประมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ปัจจุบันนิยมใช้สารลดปริมาณน้ำในอัตราสูง (High Range Water Reducing: HRWRA) หรือที่เรียกทั่วไปว่า Superplasticizer สามารถลดปริมาณน้ำได้มากกว่าปกติ (ประมาณร้อยลิ15-30) ทำให้คอนกรีตสดมีค่าความยุบตัวสูงถึง 20 เซนติเมตรหรือมากกว่า โดยไม่เกิดการแยกตัว จึงเหมาะที่จะใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete : HSC) คอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete : HPC) หรือคอนกรีตปั๊ม ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวเร็วมาก (30-60 นาที) จึงจำเป็นต้องวางแผนงานในการเทและตกแต่งผิวให้ดี สารเคมีที่ใช้เป็นชนิดของเหลว ได้แก่ (ก) สารประกอบของเกลือ ซัลโฟเนทมิลาไมน์ ฟอร์มาลดีไฮด์ คอนเดนเซท (Sulphonated melamine formaldehyde condensates) (ข) สารประกอบของเกลือ ซัลโฟเนทแนพทาลีน ฟอร์มาลดีไฮด์ คอนเดนเซท (Sulphonated nap hated naphthalene formaldehyde condensates) มีราคาแพงกว่าสารลดปริมาณน้ำแบบธรรมดา

2.3.6 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามคำกำจัดความของ ASTM C 618 หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกา และอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)” โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากขบวนการธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaoin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

มาตรฐาน ASTM C 618-99 ได้จำแนกวัสดุปอซโซลานเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. Class N ได้แก่ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) คือ วัสดุที่ได้จากการระเบิดภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพรุน (Pumice) เป็นต้น

2. Class F ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificia Pozzolan) คือ วัสดุที่ได้จากกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล ขี้เถ้าแกลบ เป็นต้น

3. Class C ได้แก่ สารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่นเดียวกับ Class F แต่มีข้อกำหนดคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกชั้นของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618-99

คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)	**ชั้นของวัสดุปอซโซลาน**		
	N	**F**	**C**
SiO_2+Ai_2O_3+Fe_2O_3 (max %)	70	70	70
SO_3 (max %)	4	5	5
MgO (max %)	5	5	5
Na_2O (max %)	1.5	1.5	1.5
Loss of Ignition (max %)	10	12	6
Moisture Content (max %)	3	3	3
Pozzolanic Index (max %)	75	75	75
Water Requirement (max %)	115	105	105

ที่มา: ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552

2.3.6.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ หรือ C-A-H)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไฮดรอกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง CSH และ CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของ

คอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน (Fray, 1989) และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (Hansen, 1990)

2.3.6.2 หินผุ

บริษัท สินเขาถ้ำพัฒนกิจ จำกัด (2552) หินผุเป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่พบในแหล่งที่มีหินภูเขาไฟ หินแกรนิต เฟลดสปาร์ หรือในแหล่งดินขาว ซึ่งจากแหล่งที่พบจะมีวัตถุดิบอยู่ 4 ลักษณะ คือ

1. ดินขาว ได้แก่วัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผงดินสีขาว
2. หินผุ ได้แก่วัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นหินสีขาว มีความแข็งน้อย
3. หินสด ได้แก่วัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นหินสีขาวที่มีความแข็งมากกว่าหินผุ
4. หินแข็งชนิดต่างๆ เช่นหินเขี้ยวหนุมาน ทราย และเฟลดสปาร์

ลักษณะของดินขาว หินผุ และหินสด ที่รวมกันอยู่นี้ในภาษาญี่ปุ่นเรียกว่า โทเซกิ (Tosiki) ซึ่งตรงกับคำว่า ไชนาสโตน (China Stone) หินพอตเตอรี (Pottery Stone) หรือหินพอร์สเลน (Porcelain Stone) หรือคอร์นิชสโตน (Cornish Stone) หินผุนี้เกิดจากสายน้ำร้อนที่ดันตัวผ่านหินต้นกำเนิด (Mother Rock) จนหินต้นกำเนิดนั้นกลายสภาพเป็นไชนาสโตน ควอร์ตซ (China Stone Quartz) ซึ่งโดยปกติโครงสร้างทางแร่ของหินผุจะประกอบด้วยควอร์ตซ และไมกา (White Mica ; $K_2O\ 3Al_2O_3{\cdot}6SiO_2{\cdot}H_2O$) เป็นหลัก ควอร์ตซจะทนไฟสูง ไม่มีความเหนียว และไม่มีความสามารถในการหลอม ส่วนไมกาจะมีสมบัติคล้ายดินขาว คือมีความเหนียว ทำให้สภาพการไหลตัวดีขึ้น และมีความสามารถในการหลอมตัวเหมือนหินฟันม้าจึงใช้ทำเนื้อเซรามิกส์พอร์สเลนได้โดยไม่ต้องผสมวัตถุดิบตัวอื่น

การเกิดหินผุ มี 3 ลักษณะ คือ

1. เกิดจากหินต้นกำเนิดที่เป็นหินหนืดที่แทรกดันตัวผ่านหินท้องที่ (Country Rock หรือ Wall Rock) ขึ้นสู่ผิวโลกแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในด้วยตนเองจนกลายเป็นหินผุจะสังเกตเห็นว่า หินท้องที่จะมีลักษณะแตกต่างหรือเป็นคนละประเภทกับหินต้นกำเนิด

2. เกิดจากหินหนืดที่ถูกดันตัวและเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยการพัดพาของน้ำร้อนจนกลายเป็นหินต้นกำเนิดที่เป็นหินผุ (หินท้องที่มักเป็นหินภูเขาไฟ หรือหินขี้เถ้าภูเขาไฟ) การเกิด

ประเภทนี้ หินท้องที่และหินต้นกำเนิดจะเป็นหินประเภทเดียวกัน และมักจะจับตัวกันเป็นพื้นที่กว้าง

3. เกิดจากหินภูเขาไฟที่ประกอบไปด้วยหินภูเขาไฟที่มีส่วนประกอบเป็นชนิดบะซอลต์ไปจนถึงชนิดไรโอไลต์ พบว่าช่วงแรกของการเกิดภูเขาไฟจะให้หินบะซอลท์ หินบะซอลท์แอนดีไซต์ และหินแอนดีไซท์ และต่อมาเป็นการระเบิดของภูเขาไฟชนิดไรโอไลต์ เกิดการระเบิดอย่างรุนแรง ทำให้เกิดการสะสมของชั้นตะกอนภูเขาไฟ เป็นชั้นหนาและเกิดการแผ่กระจายตามพื้นที่และมีชั้นหินแก้วภูเขาไฟเกิดเป็นชั้นหนาวางตัวอยู่ล่างและอยู่บนชั้นตะกอนภูเขาไฟ ส่วนชั้นบนสุดจะเป็นชั้นของหินไรโอไลต์ ซึ่งเกิดจากลาวาไหลปกคลุมชั้นหินทั้งหมด และหลังจากนั้นเกิดการไหลของหินบะซอลท์ปกคลุมพื้นที่ราบรอบเทือกเขา ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์นิยมใช้หินผุ ในการทำน้ำเคลือบ และเนื้อดินเซรามิกส์ ซึ่งหินผุจัดเป็นหินแกรนิตชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ คือ หินฟันม้า ควอร์ตซ ดินขาว และไมกา การแบ่งชนิดของหินผุ จะใช้ปริมาณของหินฟันม้าที่มีอยู่ในหินผุเป็นเกณฑ์ โดยแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

1. ฮาร์ด เพอร์เพิล (Hard Purple) เป็นชนิดที่มีหินฟันม้าสูง หลอมตัวดีที่สุด มีราคาสูง

2. ไมด์ เพอร์เพิล (Mild Purple) มีหินฟันม้าน้อยกว่าชนิดแรก มีดินขาวมากขึ้น จุดหลอมตัวสูงขึ้น

3. ดรายไวต์ (Dry White) มีหินฟันม้า และมีดินขาวสูง จุดหลอมตัวสูง เนื้อแร่อ่อนกว่าชนิดฮาร์ด เพอร์เพิล และไมด์ เพอร์เพิล มีฟลูออไรด์ (Fluoride) ต่ำมาก

4. บัฟฟ์สโตน (Buff Stone) เนื้อแร่มีสีเหลืองอ่อน เนื่องจากมีสารประกอบของเหล็กจึงไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความขาว

ความแตกต่างระหว่างเกรดต่างๆ คือ ปริมาณดินขาว หินฟันม้า จุดหลอมตัว และความแข็ง ถ้ามีดินขาวปริมาณมาก หินฟันม้าน้อย จุดหลอมตัวจะสูง ความแข็งต่ำ คุณภาพจะด้อยกว่า

ตารางที่ 2.2 ปริมาณองค์ประกอบในโครงสร้างทางแร่ของหินผุ

ชนิดของหินผุ	องค์ประกอบในโครงสร้างทางแร่				
	ควอร์ตซ	ไฮโดรรัสมิกส์	ดินขาว	หินฟันม้า	แร่อื่นๆ
Hard Purple	30.1	21.2	0.3	45	4
Mild Purple	28.2	23.5	2.7	41	5
Dry White	36.4	26	9.6	25	3
Buff Stone	26.4	32.7	5.8	30	5

ที่มา: บริษัท สินเขาถ้ำพัฒนกิจ จำกัด (2552)

หมายเหตุ: แร่อื่นๆ หมายถึงฟลูออไรด์ อะพาไตต์ โปแตส รูไทล์ และทัวร์มาลีน โดยมากแล้วพบแร่เหล่านี้ทุกตัวปนอยู่เล็กน้อย เนื่องจากหินผุไม่ได้หมายถึงแร่ใดแร่หนึ่งโดยเฉพาะ แต่หมายถึงส่วนผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแร่ต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว

ผลวิเคราะห์ทางเคมีของหินผุ มีดังต่อไปนี้

ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 71.0

อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 16.82

เฟอร์ริกออกไซด์(Fe_2O_3) ร้อยละ0.16

แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 1.60

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ 0.05

โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ 6.57

โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 2.29

แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) ร้อยละ 0.50

Loss of ignition (LOI) ร้อยละ 1.25

หรือแสดงในรูปสูตรเอ็มไพริคัล (Empirical Formula) ได้ดังนี้

0.200 CaO 1.171 Al_2O_3 8.450 SiO_2

0.492 K_2O 0.007 Fe_2O_3

0.257 Na_2O

0.007 MgO

0.042 CaF_2

สำหรับประเทศไทยพบหินผุอยู่หลายแหล่ง แต่แหล่งที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ได้แก่ที่จังหวัดลำปาง ลพบุรี กาญจนบุรีและเพชรบุรี มีชื่อทางการค้าว่า พอตเตอรีสโตน (Pottery Stone) โดยมีลักษณะเด่นดังต่อไปนี้

1. มีไพไรต์ปริมาณต่ำมาก (Pyrite; Iron Sulphate; FeS_2) ซึ่งไพไรต์เป็นตัวทำให้เกิดตำหนิสีดำ

2. มีลักษณะเด่นของโครงสร้างทางแร่ดังนี้

2.1 ในส่วนที่อ่อนจะมีควอร์ตซ และไมกาเป็นส่วนประกอบหลัก มีดินขาวเพียงเล็กน้อย

2.2 ในส่วนที่แข็งมักจะมีหินฟันม้าปนอยู่ และเป็นหินฟันม้าชนิดโซดา เป็นส่วนใหญ่

2.3 บางครั้งจะพบว่ามีมอนท์มอริลโลไนต์ ปนอยู่ด้วย

3. ส่วนที่อ่อนสามารถบดเปียกได้ง่าย หรือสามารถทำให้ละเอียดได้ด้วยเครื่องกวนน้ำดินกำลังสูง

4. จะมีเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ปนอยู่ประมาณร้อยละ 0.5

5. หลังจากบดด้วยหม้อบด (Ball Mill) สามารถนำมาทำเนื้อดินเซรามิกส์ สำหรับอุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้นและบุผนังที่ไม่ต้องการความขาวของเนื้อดินมากนัก

6. ในโครงสร้างทางแร่ของเนื้อผลิตภัณฑ์พอร์สเลนที่ทำจากหินผุ ของลพบุรี มากกว่าร้อยละ 90 จะพบผลึกเล็กๆ ของมัลไลต์ ที่มีขนาดประมาณ 1 - 2 ไมโครเมตรมากมาย

หินผุมีจุดหลอมละลายประมาณ 1,150 - 1,300 องศาเซลเซียส ในเนื้อดินเซรามิกและน้ำเคลือบจะทำหน้าที่เป็นตัวลดจุดหลอมละลายเช่นเดียวกับ หินฟันม้า แต่หินผุจะหลอมตัวได้น้อยกว่า และมีโอกาสทำให้ผลิตภัณฑ์บิดเบี้ยวต่ำกว่า จึงนิยมใช้หินผุร่วมกับหินฟันม้า ทั้งในน้ำเคลือบและเนื้อเซรามิกเพราะหินผุเป็นแร่ที่ให้ ซิลิกา อลูมินา และโปแตส ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดแก้วคุณภาพดี และช่วยหลอมละลายสารอื่นๆ ช่วยเพิ่มความหนาแน่นและทำให้ความแข็งแรงหลังเผาสูงขึ้น

ตารางที่ 2.3 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในโครงสร้างของหินผุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	**ลำปาง**	**ลพบุรี**
SiO_2	76.61	75.88
Al_2O_3	13.09	11.69
Fe_2O_3	0.35	0.81
MgO	0.01	<0.01
CaO	0.15	0.20
Na_2O	5.20	3.67
K_2O	1.59	4.74
TiO_2	0.05	0.13
P_2O_5	< 0.01	< 0.01
MnO_2	0.02	0.01
Cr_2O_5	0.01	<0.01
LOI	3.92	3.67

ที่มา: บริษัท สินเขาถ้ำพัฒนกิจ จำกัด (2552)

หินผุเป็นแร่ที่ให้ ซิลิกา อลูมินา และโปแตส ในอัตราส่วนที่เหมาะสม

ข้อดีในการใช้หินผุ

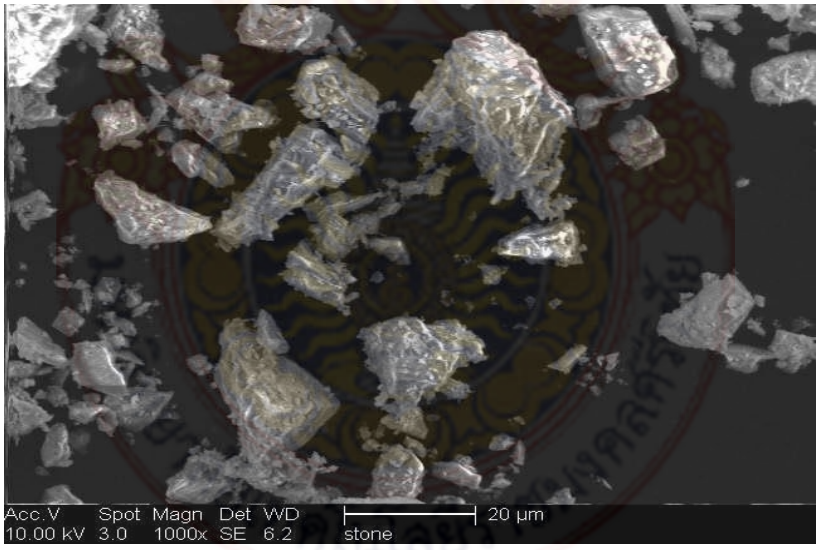
1. เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัวของเนื้อดิน ทำให้สามารถใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำลง
2. เนื่องจากหินผุจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเฟลดสปาร์ ดังนั้นจึงช่วยลดเวลาในการบดลง จึงช่วยลดพลังงานในการบดเนื้อดินลงด้วย
3. หินผุจะมีราคาถูกกว่าเฟลดสปาร์อยู่มาก ดังนั้นจึงช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้มาก

การใช้ประโยชน์หินผุในอุตสาหกรรม

- อุตสาหกรรมเซรามิก วัตถุประสงค์ในการใช้งานหินผุในอุตสาหกรรมเซรามิกนั้นเพื่อเป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัว (Flux) ในเนื้อดินและในสีเคลือบ ในอุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก ลูกถ้วยไฟฟ้า ถ้วยชาม วัสดุทนไฟ
- อุตสาหกรรมเกษตร ใช้สำหรับเติมลงไปในปุ๋ย ตัวช่วยทำความสะอาดบ่อปลา

คุณสมบัติของฝุ่นหินผุผสมคอนกรีต

คุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินผุมีสีน้ำตาลอ่อน รูปร่างลักษณะของอนุภาคของฝุ่นหินผุเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope ดังภาพที่ 2.1 พบว่าอนุภาคของฝุ่นหินผุมีรูปร่างลักษณะส่วนใหญ่เป็นเหลี่ยมมุมผิวขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระและตัน (ชูเกียรติ ชูสกุล, 2553)



ภาพที่ 2.1 อนุภาคของฝุ่นหินผุ ขยาย 1000 เท่า

ที่มา: ชูเกียรติ ชูสกุล, 2553

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และฝุ่นหินผุ

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	ฝุ่นหินผุ	ASTM C 618-99 Class N
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.9	36.07	} 70
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.7	19.86	
ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.4	13.67	
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.7	6.29	4
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.2	2.47	5
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.2	1.31	1.5
โพเทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.3	2.12	-
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.4	16.78	-
Loss on ignition (LOI)	0.9	5.80	10
ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5)	-	0.21	-

ที่มา: ชูเกียรติ ชูสกุล, 2553

องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินผุจากตารางที่ 2.4 พบว่ามีปริมาณของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 36.07, 19.86 และ 13.67 ตามลำดับ เมื่อรวมปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 69.60 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ ร้อยละ 5.80 เมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618-99 สามารถจัดฝุ่นหินผุเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ซึ่งเป็นสารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

2.4 กำลังอัดของคอนกรีต

รัฐภูมิ ปริชาตปรีชา, 2553 ได้กล่าวว่า กำลังอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีต เนื่องจากออกแบบคอนกรีตส่วนมากมักจะออกแบบให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดอย่างเดียว ถึงแม้คอนกรีตจะรับแรงดึงได้บ้างก็มักจะไม่นำมาคิด ในองค์อาคารส่วนที่ต้องรับแรงดึงมักจะให้เหล็กเสริมรับแรงส่วนนี้ไป กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิภาคส่วนผสม (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์) อายุการบ่มและอื่นๆ เนื่องจากวิวัฒนาการทางวิชาการของคอนกรีตได้พัฒนาไปมาก จึงทำให้ปัจจุบันนี้สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัดถึง 700 กิโลกรัมต่อตาราง

เซนติเมตร หรือสูงกว่าก็ได้ อย่างไรก็ตามคอนกรีตในงานก่อสร้างในประเทศไทยยังมีกำลังอึดไม่สูงนัก (ประมาณ100-300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) กำลังอัดของคอนกรีตนั้น หมายถึงกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่างมาตรฐานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ในบางครั้งแท่งตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ก็มักนิยมใช้ในการก่อสร้างแต่กำลังอัดของลูกบาศก์ จะต่ำกว่ากำลังอัดของรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การกำหนดใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญ ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงขีดความสามารถของผู้รับเหมาก่อสร้างด้วยว่าจะมีความสามารถผลิตคอนกรีตที่มีคุณภาพนั้นได้หรือไม่ โดยปกติผู้ออกแบบจะกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตสำหรับก่อสร้างจริงให้สูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้คำนวณออกแบบประมาณร้อยละ 15-25 เนื่องจากกำลังของคอนกรีตในที่ก่อสร้างย่อมต่ำกว่ากำลังของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

2.5 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง

ACI 211.4R ได้ให้แนวทางในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แนวทางดังกล่าวคล้ายกับการออกแบบคอนกรีตกำลังธรรมดา โดยดูเรื่องกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการเทได้ให้เป็นไปตามที่ต้องการ คอนกรีตที่จะออกแบบส่วนผสมต้องเป็นคอนกรีตน้ำหนักปกติ ไม่ใส่สารกักกระจายฟองอากาศ มีกำลังอัดระหว่าง 40- 80 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552)

วิธีออกแบบสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 เลือกความสามารถเทได้ และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

เลือกความสามารถเทได้ของคอนกรีตโดยใช้ ตารางที่ 2.7 ซึ่งแนะนำให้ใช้ค่ายุบตัว 25 ถึง 50 มิลลิเมตร สำหรับคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษหรือซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ เพื่อให้มีปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับผสมและทำให้สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และแนะนำให้ใช้ค่ายุบตัว 50-100 มิลลิเมตร สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์

ตารางที่ 2.5 ค่ายุบตัวที่แนะนำในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูง

ชนิดของคอนกรีต	ค่ายุบตัว (มม.)
คอนกรีตที่ไม่ใส่สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์	50-100
คอนกรีตที่ใส่สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (สารลดน้ำพิเศษ)	25-50

หมายเหตุ: หาค่าเผื่อสำหรับกำลังรับแรงขั้นต่ำและกำลังรับแรงเฉลี่ยในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง

ในกรณีของการออกแบบใหม่โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและขาดข้อมูลภาคสนาม ACI 211.4R แนะนำให้ใช้สมการที่ 6 สำหรับประมาณกำลังรับแรงของคอนกรีตภาคสนาม

$$\sigma_{cr} = [\sigma_c + 9.65] / 0.9 \quad (6)$$

ทั้งนี้จากประสบการณ์พบว่ากำลังอัดของส่วนผสมเดียวกันในภาคสนามจะมีค่าต่ำกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 90 ของการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังนั้น

$$\sigma_{cr} = 0.9\ \sigma_{cr}(lab) \quad (7)$$

$\sigma_{cr}(lab)$คือกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ขั้นที่ 2 เลือกขนาดใหญ่สุดและปริมาณของมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 2.6 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ

กำลังอัดของคอนกรีต	ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ
ต่ำกว่า 62 MPa	20-25
สูงกว่า 62 MPa	10-12.5

เลือกปริมาณของมวลรวมหยาบตามตารางที่ 2.6 สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังสูงกว่า 62 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร ควรเลือกใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กลง คือประมาณ 10-12.5 มิลลิเมตร ปริมาณมวลรวมหยาบจะขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวมและกำลังรับแรงอัดที่ต้องการ สำหรับคอนกรีตกำลังสูงปริมาณมวลรวมหยาบจะสูงกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา

ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรของคอนกรีต

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (มม.)	10	12.5	20	25
อัตราส่วนปริมาตรของมวลรวมหยาบแห้งและกระทุ้งแน่นต่อปริมาตรของคอนกรีต	0.65	0.68	0.72	0.75

หมายเหตุ: ใช้กับทรายที่มีโมดูลัสความละเอียด 2.5-3.2

ขั้นที่ 3 ประมาณปริมาณน้ำและฟองอากาศ

ปริมาณน้ำที่จะให้ความสามารถเทได้ที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ซึ่งปริมาณน้ำนี้จะมีค่าต่ำกว่าปริมาณน้ำของคอนกรีตกำลังธรรมดา นอกจากนี้ยังประมาณปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตด้วย

ตารางที่ 2.8 ปริมาณน้ำและฟองอากาศ

ค่ายุบตัวของคอนกรีต (มม.)	ปริมาณน้ำ (กก/ม^3)			
	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (มม.)			
	10	12.5	20	25
25-50	184	175	169	166
50-75	190	184	175	172
75-100	196	190	181	178
ปริมาณฟองอากาศ (ร้อยละ)				
-คอนกรีตธรรมดา	3.0	2.5	2.0	1.5
-คอนกรีตผสมสารซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์	2.5	2.0	1.5	1.0

ปริมาณน้ำที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 เป็นค่าสำหรับทรายที่มีช่องว่าร้อยละ 35 ถ้าใช้ทรายที่มีช่องว่างต่างกันไปต้องทำการปรับปริมาณน้ำโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Wa = (V-35) \times 4.75 \quad (8)$$

เมื่อ Wa = ปริมาณน้ำที่ต้องปรับแก้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V = ร้อยละของช่องว่างของทราย = (1-M/S x 100)

ขั้นที่ 4 เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ในคอนกรีตกำลังสูงจะใส่วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เพื่อให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น ดังนั้นจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/(C+P)) ในการกำหนดกำลังรับแรงอัด ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวม ได้แสดงในตารางที่ 2.9

ขั้นที่ 5 คำนวณหาปริมาณวัสดุประสาน

หาปริมาณวัสดุประสานซึ่งต้องได้ความคงทนของคอนกรีตตามที่ต้องการด้วย และเมื่อปริมาณของวัสดุประสานที่คำนวณได้มากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อาจจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมอื่น เนื่องจากคุณสมบัติของส่วนผสมดังกล่าวจะแตกต่างไปอีก

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

กำลังอัดภาคสนาม (MN/m^2)	**อายุ (วัน)**	**W / (C+P)**							
		คอนกรีตกำลังสูงที่ไม่ผสมสาร Superplasticizer				**คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมสาร Superplasticizer**			
		ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (mm.)				**ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (mm.)**			
		10	**12.5**	**20**	**25**	**10**	**12.5**	**20**	**25**
48	28	0.42	0.41	0.40	0.39	0.50	0.48	0.45	0.43
(490kg./cm^2)	56	0.46	0.45	0.44	0.43	0.55	0.52	0.48	0.46
55	28	0.35	0.34	0.33	0.33	0.44	0.42	0.40	0.38
(560 kg./ cm^2)	56	0.38	0.37	0.36	0.35	0.48	0.45	0.42	0.40
62	28	0.30	0.29	0.29	0.28	0.38	0.36	0.35	0.34
(630 kg./ cm^2)	56	0.33	0.32	0.31	0.30	0.42	0.39	0.37	0.36
69	28	0.26	0.26	0.25	0.25	0.33	0.31	0.31	0.30
(770 kg./ cm^2)	56	0.29	0.28	0.27	0.26	0.37	0.35	0.33	0.32
76	28	-	-	-	-	0.30	0.29	0.27	0.27
(775 kg./ cm^2)	56	-	-	-	-	0.33	0.31	0.29	0.29
83	28	-	-	-	0.27	0.27	0.26	0.25	0.25
(846 kg./ cm^2)	56	-	-	-	0.30	0.30	0.28	0.27	0.26

ขั้นที่ 6 คำนวณส่วนผสมพื้นฐาน

ในขั้นตอนนี้จะคำนวณส่วนผสมพื้นฐาน (Basic Mixture) โดยใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเพื่อเป็นส่วนผสมอ้างอิง

ขั้นที่ 7 คำนวณส่วนผสมคู่เคียง

เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินมีความหลากหลายซึ่งกระทบต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้นจึงแนะนำให้คำนวณส่วนผสมคู่เคียง (Companion Mixtures) ซึ่งเป็นคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน โดยอย่างน้อยให้ใช้ปริมาณเถ้าถ่านหิน 2 ค่า ซึ่งปริมาณเถ้าถ่านหินที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของเถ้าถ่านหิน ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ปริมาณเถ้าถ่านหินที่ใช้แทนปูนซีเมนต์

เถ้าถ่านหิน	ร้อยละของเถ้าถ่านหินที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ (%)
Class F	15-25
Class C	20-35

ขั้นที่ 8 คำนวณน้ำหนักส่วนผสม

ทำการปรับน้ำหนักของทรายและหิน เนื่องจากค่าที่ใช้ในการออกแบบเป็นค่าที่อบแห้ง แต่ในสภาพจริงจะมีความชื้น ดังนั้นต้องใช้ทรายและหินเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยความชื้นที่มีอยู่ในทรายและหิน ขณะเดียวกันต้องปรับปริมาณน้ำเนื่องจากความชื้นในหินและทราย และปริมาณน้ำที่หินและทรายดูดซับได้

ขั้นที่ 9 การทดลองผสมและปรับส่วนผสม

ทำการทดลองผสมและปรับส่วนผสมเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้ตามที่ออกแบบไว้เบื้องต้น ในขั้นทดลองผสมให้ปรับปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งจะต้องทำการปรับปริมาณวัสดุประสานตามเพื่อให้ W/(C+P) คงที่ และปรับปริมาณทรายเพื่อให้ปริมาณของส่วนผสมคงที่

ขั้นที่ 10 การใส่สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์และปรับส่วนผสม

การใส่สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ให้ประมาณจากข้อมูลของผู้ผลิตซึ่งอาจอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-1.0 ของน้ำหนักของวัสดุประสาน ขึ้นอยู่กับความสามารถเทได้ของส่วนผสม การใช้สาร

ซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ดังกล่าวในปริมาณนี้ (ร้อยละ 0.5-1.0) ยังไม่จำเป็นต้องปรับส่วนผสมหากใช้ปริมาณมากจำเป็นต้องปรับปริมาณวัสดุประสานและปริมาตรของส่วนผสม ตลอดจนปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ด้วย

ขั้นที่ 11 การทดสอบภาคสนามและการเลือกส่วนผสม

เมื่อได้ส่วนผสมที่มีความสามารถเทได้และกำลังตรงตามที่ต้องการจากการผสมในห้องปฏิบัติการแล้ว ขั้นสุดท้ายคือการผสมในภาคสนามโดยใช้การตวงวัดและการทำงานจริง โดยปรับให้ได้ค่าความสามารถเทได้และกำลังตามที่ต้องการ

2.6 อายุที่ใช้ทดสอบคอนกรีตกำลังสูง

การเลือกอายุในการทดสอบคอนกรีตจะมีผลต่อการเลือกส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงด้วย โดยทั่วไปนิยมใช้การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์ แต่สำหรับงานที่ต้องการคอนกรีตมีกำลังที่สูงมากในช่วงอายุต้น เช่น งานคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งต้องการกำลังอัดที่สูงในช่วงอายุ 12 ถึง 24 ชั่วโมง หรืองานซ่อมแซมถนนซึ่งต้องการกำลังอัดที่สูงในช่วงอายุประมาณ 3 วัน งานเหล่านี้ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 และไม่ควรใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่ำในส่วนผสมคอนกรีต คอนกรีตกำลังสูงมักมีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานอยู่ด้วย ซึ่งจะให้กำลังแก่คอนกรีตเพิ่มขึ้นแม้อายุของคอนกรีตจะมากกว่า 28 วัน ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตอาจกำหนดกำลังอัดที่อายุ 56 หรือ 90 วัน และทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันด้วย เพื่อดูแนวโน้มว่าเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 56 หรือ 90 วันจะมีกำลังสูงตามที่ต้องการ เพราะคอนกรีตกำลังสูงนิยมใช้เทเสาหรือฐานรากซึ่งกว่าจะรับน้ำหนักอย่างเต็มที่ตามที่ออกแบบไว้ต้องใช้เวลาในการก่อสร้างอาคารมากกว่า 6 เดือนขึ้นไป ซึ่งในกรณีเช่นนี้การใช้เถ้าถ่านหินหรือวัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงจะทำให้ประหยัดและมีกำลังอัดประลัยตามอายุที่ต้องการ

2.7 ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำ

คอนกรีตกำลังสูงจะมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา ปริมาณปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 400 ถึง 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้กำลังรับแรงของคอนกรีตลดลง นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนที่พอเหมาะสามารถเพิ่มปริมาณวัสดุประสานในส่วนผสมและทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ปริมาณวัสดุประสานที่ให้กำลังอัดสูงสุดจะขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ ชนิดของทรายและหิน รวมทั้งวัสดุปอซโซลานที่ใช้ ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์บวกวัสดุปอซโซลาน) แทนการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ในสารเคมีผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในการลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตจะมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นปริมาณน้ำที่ใช้จริงต้องรวมปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสารเคมีผสมเพิ่มเหล่านั้นด้วย โดยทั่วไปอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในคอนกรีตกำลังสูงมักอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.40

2.8 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ธีรราช ลีกีรติกุล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2542) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตกำลังสูง พบว่าคอนกรีตใช้เถ้าลอยขนาดเล็กที่ได้จากการคัดแยกขนาดโดยมีอนุภาคเฉลี่ย 2.8 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25 และ 35 ทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย และมีการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่ไม่ได้คัดแยกขนาด ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่คัดขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ ที่ร้อยละ 15, 25 และ 35 เริ่มมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอยในช่วงอายุตั้งแต่ 7 วันขึ้นไป ทำให้ปัญหาเรื่องการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ช้าเนื่องจากการใช้เถ้าลอยที่ไม่ได้คัดแยกขนาดในการผสมคอนกรีตหมดไป นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงแทนที่ปูนซีเมนต์จะมีค่ายุบตัวที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน และคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าลอยขนาดเล็กเป็นอัตราส่วนผสมจะทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย ส่งผลให้การใช้เถ้าลอยขนาดละเอียดมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง

วิศว จักรไพศาล และชัยโรจน์ จักรไพศาล (2542) ได้ศึกษาผลของขี้เถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานิกของคอนกรีตสมรรถนะสูง (คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง มีกำลังการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็ว สามารถใช้งานได้สะดวก และมีคุณภาพดีกว่าคอนกรีตธรรมดา) ด้วยการศึกษาหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลง โดยใช้เถ้าลอยแม่เมาะ ซึ่งสามารถบอกถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาเคมี แทนการประมาณปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรด ซึ่งมีสมการเคมีที่ยุ่งยากกว่า พบว่าสาเหตุที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีกำลังอัดที่สูงขึ้นนั้นเกิดจากสารประกอบที่เพิ่มแรงอัดคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงตามปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 15 - 25 โดยน้ำหนักของของปูนซีเมนต์ ส่วนปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมทั้งทางด้านกำลังอัดและความสามารถทำงานได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยที่สุด และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 0.26 - 0.32 เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีสมรรถนะสูง

สัญญชัย สะอาดกิตินันท์ (2545) ได้ทำการศึกษาการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะ แบบคัดและไม่คัดแยกขนาด โดยปรับปรุงมาตรฐานเอซีไอ ที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยทำการทดสอบชุดตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.35, 0.38, 0.41 และ 0.44 และนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดอยู่ระหว่าง 5-8 เซนติเมตร ซึ่งทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 7, 28 และ 56 วัน จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดร้อยละ 15 - 35 จะให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย และคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 25 และ 35 จะให้กำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 28 วัน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบคัดแยกขนาดมีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแบบไม่คัดแยกขนาดทุกอายุ

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2546) ได้ศึกษาวัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดอัดให้ละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้โดยเถ้าปาล์มน้ำมัน

บดละเอียดมีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 17.1 และ 1.5 สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 และ40 ตามลำดับโดยมีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุตั้งแต่ 7 วันขึ้นไป

ไชยนันท์ รัตนโชตินันท์ (2548) ได้ทำการศึกษากำลังอัดและการเกิดความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจาก จ.ชลบุรีและ จ.สุราษฎร์ธานี ที่มีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 2 เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) 3 ค่าคือ 0.50, 0.55 และ 0.60 กำหนดปริมาณวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 5-10 เซนติเมตร และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน และวัดความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากการบด จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจาก จ.ชลบุรี มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี ร้อยละ 10 และ 20 ทุกอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมตั้งแต่อายุ 14 หรือ 28 วันขึ้นไป ส่วนความร้อนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี อุณหภูมิจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยมีค่าลดลงระหว่าง 0.3 - 0.6 °C จากคอนกรีตควบคุม

เจษฎาพร ศรีภักดี และเจษฎา เกษมเศรษฐ์ (2549) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบคอนกรีตผสมเถ้าลอยกำลังสูงผสมและไม่ผสมสารลดน้ำอย่างแรงสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมตามวิธีการของเอซีไอที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยศึกษาชุดตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.23, 0.28, 0.33 และ 0.38 และผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขนาดร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดก่อนใส่สารลดน้ำอย่างแรงเท่ากับ 3-5 เซนติเมตร และนำส่วนผสมที่ได้มาผสมสารลดน้ำอย่างแรงที่จุดอิ่มตัว และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 56 วัน พบว่าเมื่อผสมสารลดน้ำอย่างแรงในคอนกรีตสดทำให้มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น 24 – 26 เซนติเมตร และคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 15 ให้กำลังอัดสูงที่สุดและลดลงเมื่อมีการแทนที่มากขึ้นในช่วงอายุ 1-56 วัน สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเดียวกันที่ 0.28 - 0.38 คอนกรีตที่

ผสมสารลดน้ำอย่างแรงจะให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมสารลดน้ำอย่างแรง แต่ที่อัตราส่วน 0.23 คอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำอย่างแรงจะให้ค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมสารลดน้ำอย่างแรง

ชูเกียรติ ชูสกุล (2553) ได้ศึกษาคุณสมบัติฝุ่นหินผุเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานก่อและงานฉาบ โดยศึกษากำลังอัดและความต้านทานแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุที่บดละเอียด โดยนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับฝุ่นหินผุในสัดส่วน 85:15, 80:20, 75:25 และ 70:30 โดยน้ำหนัก แล้วเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน ผลการศึกษาด้านกำลังอัดพบว่าที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอัตราส่วนผสม ที่อายุ 7 วันค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมและที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุร้อยละ 25 มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน โดยมอร์ต้าร์ที่ผสมฝุ่นหินผุร้อยละ 25 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 157, 281 และ 313 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับ ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมและทุกอายุ โดยมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุร้อยละ 20 มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกอายุ มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดเท่ากับ 11, 21 และ 26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับ

Balaguru (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมดินขาวที่อยู่ในสภาพสดและสภาพที่แข็งตัวแล้ว โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 5 และ 9 โดยน้ำหนัก และบ่มตัวอย่างคอนกรีตใน 2 ลักษณะคือ บ่มชื้น และบ่มในความร้อน พบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ดังกล่าวไม่มีผลที่ชัดเจนต่อการลดค่ายุบตัวของคอนกรีตและปริมาณอากาศในคอนกรีต (Air Content) สำหรับคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้วพบว่าดินขาวช่วยพัฒนากำลังอัดให้กับคอนกรีตเร็วมาก ทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งคอนกรีตกำลังสูงมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 15 ส่วนคอนกรีตปกติเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 และ 30 สำหรับคอนกรีตประเภทที่ 1 และ 3 ตามลำดับ การบ่มตัวอย่างในน้ำร้อนช่วยให้คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีการพัฒนากำลังอัดที่อายุทดสอบ 1 วันเพิ่มขึ้นเร็วมาก นอกจากนี้ดินขาวยังมีผลทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเป็นอย่างมาก และไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rapture) ที่ชัดเจน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

วิธีการดำเนินการการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงผสมฝุ่นหินผุ ได้แบ่งขั้นตอนออกเป็นสองขั้นตอนคือ หนึ่งขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสม และขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต โดยวิธีการดำเนินงานจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา
2. ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์
3. ทดสอบคุณสมบัติของฝุ่นหินผุ
4. ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม
5. ออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง
6. ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง
7. วิเคราะห์และประเมินผล
8. สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 เตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2514/2517 ประเภทที่ 1 และมาตรฐาน ASTM (150-71 Type 1)

3.1.2 สารประกอบวัสดุปอซโซลาน ใช้ฝุ่นหินผุ จากบ่อหิน ในอำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี มาบดด้วยเครื่องลอสแองเจิลลิส บดให้มีความละเอียดจนค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.1.3 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายที่ได้มาจากแม่น้ำ

3.1.4 มวลรวมหยาบ ใช้หินเบอร์ ⅜”

3.1.5 สารเคมีผสมเพิ่ม ใช้ SIKAMENT FF มีคุณสมบัติเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C494-81 Type A & F สารลดน้ำและลดน้ำพิเศษ

3.1.6 น้ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ใช้ประปา

3.2 ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 188) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. ขวดแก้วสำหรับหาความถ่วงจำเพาะของเลอซาทาเลีย (La Chatalia) เป็นขวดแก้วใส หน้าตัดเป็นรูปวงกลม ลักษณะคอขวดเป็นก้านยาวและมีกระเปาะเล็ก ๆ ก่อนจะถึงก้นขวดซึ่งเป็นกระเปาะกลมใหญ่ ความจุของขวดแก้วนี้ประมาณ 290 มิลลิลิตร
2. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. ถ้วยตวงหรือกรวยก้านยาว
5. ผ้าแห้งหรือแผ่นยาง
6. ลวดสำหรับเขี่ย
7. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
8. ภาชนะใส่ปูนซีเมนต์

ค่าการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง นอกจากนี้ยังใช้เป็นข้อมูลในการหาความละเอียดของปูนซีเมนต์และยังเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของปูนซีเมนต์อีกด้วย

3.3 ทดสอบคุณสมบัติของฝุ่นหินผุ

ทดสอบคุณสมบัติของฝุ่นหินผุ ก็ใช้วิธีการเดียวกับการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง แต่จะเปลี่ยนจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง มาใช้เป็นฝุ่นหินผุแทน ค่าที่ได้จากการทดสอบก็นำไปใช้ในการออกแบบคอนกรีต

กำลังสูงที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 ตราช้าง และค่าที่ได้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความละเอียดของฝุ่นหินผุอีกด้วย

3.4 ทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

3.4.1 ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 128) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
2. ขวดพิคโนมิเตอร์หรือกระบอกตวงขนาดบรรจุ 500 มิลลิลิตร
3. แบบกรวยโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ด้านบนเท่ากับ 40 ± 3 มิลลิเมตร ที่ด้านล่างเท่ากับ 90 ± 3 มิลลิเมตร และมีความสูงเท่ากับ 75 ± 3 มิลลิเมตร
4. เหล็กกระทุ้งที่มีขนาดน้ำหนัก 345 ± 15 กรัม มีหัวกระทุ้งกลมแบน และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 25 ± 3 มิลลิเมตร
5. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 ºC
6. เครื่องเป่าแบบลมร้อน
7. กระบอกฉีดน้ำ
8. ภาชนะใส่ตัวอย่าง

ค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จากการทดสอบจะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของวัสดุผสมในคอนกรีต การคำนวณส่วนผสมจะใช้น้ำหนักของมวลรวมที่อิ่มตัวผิวแห้งโดยใช้เป็นตัวเปลี่ยนน้ำหนักของวัสดุผสมเป็นปริมาตรเนื้อแท้ หรือเปลี่ยนปริมาตรเนื้อแท้ไปเป็นน้ำหนัก ส่วนค่าการดูดซึมน้ำที่ได้จากการทดสอบจะใช้เพื่อควบคุมปริมาณน้ำหรือปรับปริมาณน้ำในส่วนผสม ถ้าไม่ปรับปริมาณน้ำจะส่งผลต่อความสามารถในการเทได้ และกำลังของคอนกรีต

3.4.2 ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 127) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.5 กรัม
2. ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ

3. ถังใส่น้ำ

4. ตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และเบอร์ 16 (1.18 มิลลิเมตร)

5. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 110 ± 5 ºC

6. ผ้าซับน้ำสำหรับเช็ดตัวอย่าง

7. เทอร์โมมิเตอร์

3.4.3 ทดสอบหน่วยน้ำหนักและช่องว่างของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 29) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. ตาชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.5 กรัม

2. ช้อนตักตัวอย่าง

3. แบบเหล็กทรงกระบอกที่มีความสูงเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง

4. แท่งเหล็กกระทุ้ง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และยาวประมาณ 600 มิลลิเมตร

ค่าหน่วยน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปใช้สำหรับเปลี่ยนน้ำหนักของมวลรวมเป็นปริมาตรในการคำนวณสัดส่วนผสมคอนกรีต หน่วยน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับการกระจายขนาด รูปร่างของมวลรวม สภาพการอัดแน่น และปริมาณความชื้น มวลรวมที่มีขนาดเดียวจะมีช่องว่างมาก ขณะที่มวลรวมมีขนาดคละดีจะมีช่องว่างน้อย หรือช่องว่างลดลงจะมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น ส่วนช่องว่าง เป็นค่าแสดงถึงว่ามีอากาศแทรกอยู่ระหว่างมวลรวมเท่าใด และยังบอกถึงอัตราการอัดแน่นของวัสดุว่าแน่นเพียงใด และการลดช่องว่างระหว่างมวลรวมสามารถทำได้โดยการเลือกใช้มวลรวมที่มีขนาดคละไล่เรียงกัน จะช่วยลดปริมาณซีเมนต์เพสต์ และมีความสามารถในการเทได้ดี

3.4.4 ทดสอบหน่วยน้ำหนักและช่องว่างของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 29) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. ตาชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.5 กรัม

2. ช้อนตักตัวอย่าง

3. แบบเหล็กทรงกระบอกที่มีความสูงเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง

4. แท่งเหล็กกระทุ้ง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และยาวประมาณ 600 มิลลิเมตร

3.4.5 ทดสอบการวิเคราะห์ขนาดคละและค่าโมดูลัสละเอียดของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 33) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. ตาชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.1 กรัม
2. เตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิ 110 ± 5 ºC
3. เครื่องเขย่าและตะแกรงมาตรฐาน เช่น เบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, และ 100
4. แปรงลวด และแปรงขนอ่อน

การวิเคราะห์ขนาดคละและค่าโมดูลัสละเอียดที่ได้จากการทดสอบ จะใช้ในการควบคุมส่วนขนาดคละ และเป็นการทดสอบดูว่าขนาดคละของมวลรวมเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ เพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมแต่ละชนิดที่จะผสมรวมกันให้ได้ส่วนขนาดคละใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด มวลรวมที่มีขนาดคละที่ดีจะช่วยลดปริมาณเนื้อซีเมนต์เพสท์ที่ต้องการนำไปใช้ห่อหุ้มมวลรวมได้

3.4.6 ทดสอบการวิเคราะห์ขนาดคละและค่าโมดูลัสละเอียดของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 33) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. ตาชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.1 กรัม
2. เตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิ 110 ± 5 ºC
3. เครื่องเขย่าและตะแกรงมาตรฐาน เช่น ขนาด 1”, ¾”, ½”, และเบอร์ 4

3.5 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง

3.5.1 อัตราการใส่สารผสมเพิ่มในคอนกรีตกำลังสูง

การใส่สารซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ Type A & F ให้ประมาณจากข้อมูลของผู้ผลิตซึ่งอาจอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5–1.0 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ขึ้นอยู่กับความสามารถเทได้ของส่วนผสม การใส่สารซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ Type A & F ดังกล่าวในปริมาณนี้ (ร้อยละ 0.5–1.0) ยังไม่จำเป็นต้องปรับส่วนผสม หากใช้ปริมาณมากจำเป็นต้องปรับปริมาณวัสดุประสานและปริมาตรของส่วนผสมตลอดจนปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสารซุปเปอร์พลาสติกไซเซอร์ Type A & F ด้วย (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

3.5.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 211.4R

ตารางที่ 3.1 ผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ชุดตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ (กก.)	ฝุ่นหินผุ (กก.)	หิน (กก.)	ทราย (กก.)	น้ำ (กก.)	สารผสมเพิ่ม (กก.)
OPC	538.00	0.00	1029	637.26	185.35	0.00
DRD_0	538.00	0.00	1029	637.26	185.35	4.00
DRD_{10}	484.20	53.80	1029	637.26	185.35	4.00
DRD_{15}	457.30	80.70	1029	637.26	185.35	4.00
DRD_{20}	430.40	107.60	1029	637.26	185.35	4.00

หมายเหตุ

OPC คือ Original Portland Cement ปูนซีเมนต์ล้วน ไม่ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม

DRD_0 คือ Decomposed-Rock Dust ปูนซีเมนต์ทดแทนด้วยฝุ่นหินผุร้อยละ 0 ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม

DRD_{10} คือ Decomposed-Rock Dust ปูนซีเมนต์ทดแทนด้วยฝุ่นหินผุร้อยละ 10 ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม

3.6 ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง

3.6.1 ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตกำลังสูง

(ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ความสามารถในการเทของคอนกรีตกำลังสูงมักใช้ค่ายุบตัวของคอนกรีตในการกำหนด แต่ข้อเสียของการทดสอบโดยวิธียุบตัวของคอนกรีต คือ ไม่เหมาะที่จะใช้กับคอนกรีตที่มีการยุบตัวต่ำมากหรือสูงมาก ในการทดสอบคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวต่ำมากหรือสูงมากควรเลือกใช้วิธีเวลาของวีบี จะให้ค่าที่ดีกว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ดีควรมีความหนาแน่นสูงสามารถกระทุ้งหรือเขย่าหรือทำให้แน่นได้อย่างเต็มที่ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องเทในบริเวณที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น โดยทั่วไปแล้วมักกำหนดค่ายุบตัวของคอนกรีตประมาณ 10 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามก่อนการกำหนดค่ายุบตัวของคอนกรีตควรพิจารณาถึง รายละเอียดของแบบหล่อคอนกรีต และระยะแคบที่สุดของเหล็กเสริม การเลือกใช้ค่ายุบตัวที่ต่ำกว่า 7.5 เซนติเมตร จะต้องมีเครื่องมือในการช่วยเขย่า หรือทำคอนกรีตให้แน่น คอนกรีตกำลังสูงมีแนวโน้มที่จะสูญเสีย

ค่าการยุบตัวที่เร็วกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา ดังนั้นจึงควรตรวจสอบระยะเวลาที่สามารถเทคอนกรีตได้โดยไม่มีปัญหาเพื่อจะได้กำหนดการเทคอนกรีตให้เสร็จก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ซึ่งหากคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะทำให้ทำงานได้ยากหรือไม่สามารถเทคอนกรีตเข้าแบบได้คอนกรีตกำลังสูงมักมีความเหนียวหนืดมากกว่าคอนกรีตธรรมดามาก

3.6.2 การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143, Standard Practice for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

3.6.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

หลังจากถอดแบบแล้วนำก้อนตัวอย่างไปทำการทดสอบหากำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39 ที่ 1, 7 และ 28 วัน

3.7 การถอดแบบและบ่มคอนกรีต

หลังจากที่เทคอนกรีตเข้าแบบเรียบร้อยแล้วให้คลุมตัวอย่างด้วยถุงปูนซีเมนต์ที่ใช้แล้ว ใช้เวลาบ่มคอนกรีตประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ มาทำความสะอาดโดยใช้ผ้าเช็ดให้สะอาดก้อนจะนำไปทำการทดสอบ ส่วนก้อนตัวอย่างที่เหลือก็นำไปบ่มด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะนำมาทำการทดสอบที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

3.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.8.1 วิเคราะห์และประเมินผลคุณสมบัติของมวลรวม

การวิเคราะห์และประเมินผลคุณสมบัติของมวลรวม (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2552) จะวิเคราะห์และประเมินผลตามคุณสมบัติของมวลรวมโดยทั่วไปดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมโดยมากมีค่าอยู่ระหว่าง 2.6 ถึง 2.9

2. ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมโดยทั่วไป หินมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.5 และทรายมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.7

3. หน่วยน้ำหนักของมวลรวมมีค่าอยู่ระหว่าง 14.22 ถึง 19.23 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร

4. ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดมีค่าระหว่าง 2.25 ถึง 3.25 หินมีค่าโมดูลัสความละเอียดระหว่าง 5.5 ถึง 7.5

5. ส่วนขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุผสมควรเป็นไปตามข้อกำหนด ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 33)

3.8.2 วิเคราะห์และประเมินผลคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง เกี่ยวกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตกำลังสูง ตามมาตรฐาน ASTM C 36 ที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

บทที่ 4

สรุปผลการทดสอบ วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ

การใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกำลังสูง บทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของมวลรวม และผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งผลการทดสอบที่แสดงในบทนี้จะเป็นผลการทดสอบโดยสรุป คุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินผุ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของมวลรวม และผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินผุ

ภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบลักษณะสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หินผุที่นำมาบดละเอียดด้วยตะแกรงมาตรฐานค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 จนได้มาเป็นฝุ่นหินผุ จะมีลักษณะเป็นสีขาว ซึ่งจะแตกต่างจากสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อน

ปูนซีเมนต์ หินผุก่อนบด ฝุ่นหินผุ

ภาพที่ 4.1 การเปรียบเทียบลักษณะสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับหินผุก่อนที่จะนำมาบดและลักษณะสีของหินผุที่บดเป็นฝุ่นหินผุแล้ว

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์และฝุ่นหินผุ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน ASTM	หมายเหตุ
ความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์	3.15	3.00-3.20	ASTM C 188
ความถ่วงจำเพาะฝุ่นหินผุ	2.85	–	ASTM C 188

จากตารางที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะระหว่างความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์กับความถ่วงจำเพาะของฝุ่นหินผุ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์มีค่ามากกว่าความถ่วงจำเพาะของฝุ่นหินผุเท่ากับ 0.30 เพราะว่าปูนซีเมนต์ความละเอียดมากกว่าฝุ่นหินผุ

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมของมวลรวม

4.2.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

จากการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียด ผลจากการทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน แต่ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐาน คือ มีค่าเท่ากับ 1621 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะมีผลต่อการใช้มวลรวมละเอียดในการผสมคอนกรีต เพราะถ้ามีค่าหน่วยน้ำหนักที่มากก็ต้องเพิ่มมวลรวมละเอียดในการผสมคอนกรีตอีกด้วย ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดค่ามาตรฐานหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดอยู่ที่ 1400-1600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งค่าการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน ASTM	หมายเหตุ
ความถ่วงจำเพาะ	2.62	2.40-3.00	ASTM C 128
ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%)	0.48	$\leq$ 0.70	ASTM C 728
โมดูลัสความละเอียด (F.M)	3.16	2.30-3.20	ASTM C C33, C136
หน่วยน้ำหนัก (กก/ม^3)	1621	1400-1600	ASTM C 29

4.2.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมหยาบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด ซึ่งค่าการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน ASTM	หมายเหตุ
ความถ่วงจำเพาะ	2.77	2.40-3.00	ASTM C 127
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ(%)	0.49	$\leq$ 0.50	ASTM C 127
โมดูลัสความละเอียด (F.M)	7.47	5.50-7.50	ASTM C 33,C136
หน่วยน้ำหนัก (กก/ม^3)	1512	1400-1600	ASTM C 29

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถในการเทได้โดยการเลือกวิธีการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ชุดตัวอย่าง	สารเคมีผสมเพิ่ม (กก.)	W/C	ค่าการยุบตัวที่ออกแบบ (ซม.)	ค่าการยุบตัวของตัวอย่าง (ซม.)
OPC	4.00	0.315	5.00	3.00
DRD_0	4.00	0.315	5.00	5.00
DRD_{10}	4.00	0.315	5.00	13.00
DRD_{15}	4.00	0.315	5.00	16.00
DRD_{20}	4.00	0.315	5.00	19.00

ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตในตารางที่ 4.4 :ซึ่งตามที่ออกแบบไว้ 5 เซนติเมตร ปรากฏว่าเมื่อมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน OPC (100 : 0 : 0) มีค่าการยุบตัวต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ แต่เมื่อมีการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Type A & F ในปริมาณ 4.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 15 และ 20 จะทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 160, 220 และ 280 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มสารเคมีผสมเพิ่ม Type A & F ทำให้คอนกรีตมีความเหลวมาก มีการคลื่นไหลสูง ทำงานได้สะดวกขึ้น และช่วยเร่งการก่อตัว ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดในช่วงแรกสูง

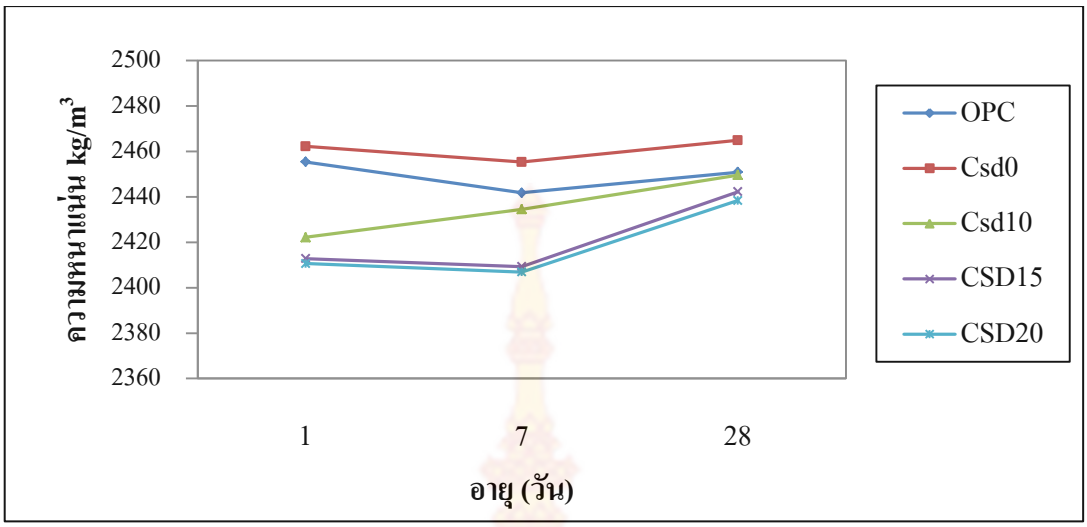
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

4.4.1 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของคอนกรีต

ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตโดยอัตราส่วน **W/C** ที่ 0.315 และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Type A & F ในปริมาณ 4.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต จะได้ความหนาแน่นของคอนกรีต ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	สารเคมีผสมเพิ่ม (กก.)	W/C	ความหนาแน่นของคอนกรีต (กก/ม^3)		
			1 วัน	7 วัน	28 วัน
OPC	4.00	0.315	2455	2442	2451
DRD_0	4.00	0.315	2462	2455	2465
DRD_{10}	4.00	0.315	2422	2434	2450
DRD_{15}	4.00	0.315	2413	2409	2442
DRD_{20}	4.00	0.315	2411	2407	2438



ภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นระหว่างปริมาณฝุ่นหินผุกับอายุของคอนกรีต

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของชุดตัวอย่างโดยเฉลี่ยทั้งหมด ปรากฏว่าค่าที่ได้จากการทำการทดสอบมาค่าที่แตกต่างกันออกไป เกิดจากการใส่คอนกรีตลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ไม่เท่ากันทุกแบบจึงทำให้ความหนาแน่นของแต่ละตัวอย่างไม่เท่ากัน ซึ่งค่าความหนาแน่นจากการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงมีค่าความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

- ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน ของชุดตัวอย่าง OPC, DRD_0, DRD_{10}, DRD_{15} และ DRD_{20} มีค่าความหนาแน่นของคอนกรีต เท่ากับ 2455, 2462, 2422, 2413 และ 2411 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

- ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน ของชุดตัวอย่าง OPC, DRD_0, DRD_{10}, DRD_{15} และ DRD_{20} มีค่าความหนาแน่นของคอนกรีต เท่ากับ 2442, 2455, 2434, 2409 และ 2407 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

- ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ของชุดตัวอย่าง OPC, DRD_0, DRD_{10}, DRD_{15} และ DRD_{20} มีค่าความหนาแน่นของคอนกรีต เท่ากับ 2451, 2465, 2450, 2442 และ 2438 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

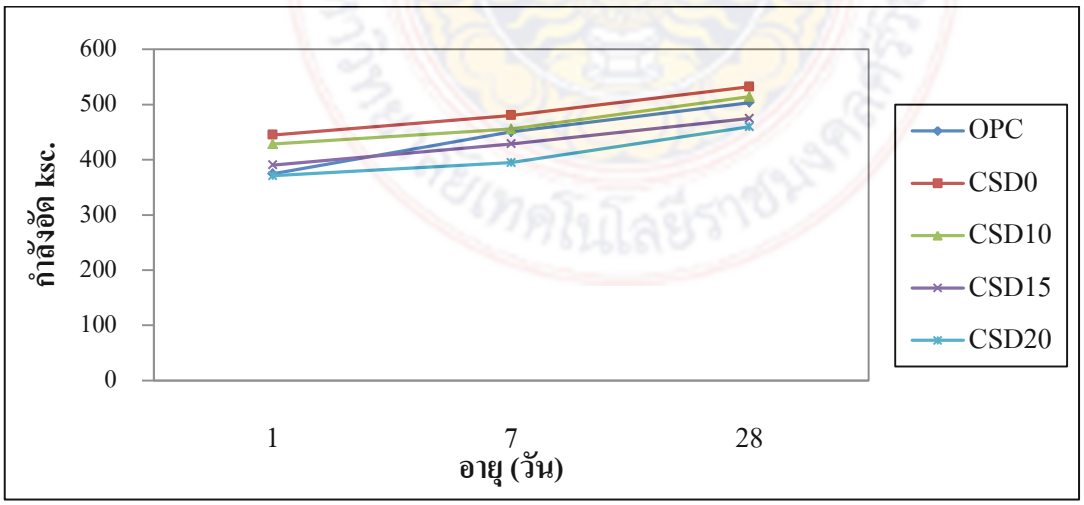
พิจารณาได้ว่าเมื่อคอนกรีตใส่สารผสมเพิ่ม Type A & F คอนกรีตจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.57 และเมื่อใส่ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ปริมาณเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของคอนกรีตจะลดลงตามลำดับ

4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ **W/C** ที่ 0.315 ใส่สารเคมีผสมเพิ่ม Type A & F ในปริมาณ 4.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	สารเคมีผสมเพิ่ม (กก.)	W/C	กำลังอัดของคอนกรีต (กก/ม^2)		
			1 วัน	7 วัน	28 วัน
OPC	4.0	0.315	374.42	450.58	503.61
DRD_0	4.0	0.315	444.97	480.26	532.12
DRD_{10}	4.0	0.315	428.25	455.80	514.37
DRD_{15}	4.0	0.315	390.44	428.59	474.71
DRD_{20}	4.0	0.315	371.00	394.64	459.76



ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์กำลังอัดคอนกรีตระหว่างปริมาณฝุ่นหินผุกับอายุของคอนกรีต

- ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน เมื่อตัวอย่าง OPC, DRD_0, DRD_{10}, DRD_{15} และ DRD_{20} จะมีค่ากำลังอัดของคอนกรีต เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ปรากฏว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 75, 89, 86, 78 และ 74 ตามลำดับ

- ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อตัวอย่าง OPC, DRD_0, DRD_{10}, DRD_{15} และ DRD_{20} จะมีค่ากำลังอัดของคอนกรีต เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ปรากฏว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 90, 96, 91, 86 และ 79 ตามลำดับ

- ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อ OPC, DRD_0, DRD_{10}, DRD_{15} และ DRD_{20} จะมีค่ากำลังอัดของคอนกรีต เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบไว้ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ปรากฏว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 101, 106, 103, 95 และ 92 ตามลำดับ โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 25 และ 20 ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้

จากผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ ปรากฏว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยปัจจัยที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มมากคือ การใส่สารเคมีผสมเพิ่ม Type A & F ในปริมาณ 4.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจากการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกำลังสูง การที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 หรือ DRD_{10} ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 514.37 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการทำคอนกรีต เพราะกำลังอัดเพิ่มจากที่ได้ออกแบบไว้ร้อยละ 3 และจะช่วยประหยัดปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 10

4.6 สรุปผลการทดสอบ

4.6.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

มวลรวมละเอียด มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.48 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,621 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.16

มวลรวมหยาบ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.77 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.49 ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,512 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.47

ฝุ่นหินผุ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.86 และปูนซีเมนต์ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15

4.6.2 คุณสมบัติของคอนกรีตสด

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (OPC) จะมีค่าการยุบตัวต่ำกว่าที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อใส่สารผสมเพิ่ม Type A & F ในปริมาณ 4.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรทำให้ค่ายุบตัวเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 60 ส่วนคอนกรีตที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10, 15 และ 20 มีค่าการยุบตัวมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้ร้อยละ 160, 220 และ 280 ตามลำดับ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าคอนกรีตมีความเหลวมากแต่ไม่มีการแยกตัว ซึ่งเพิ่มความสามารถในการเทได้มากขึ้น และเป็นไปตามคุณสมบัติที่ใช้สารผสมเพิ่มช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถเทได้มีการลื่นไหลได้ดีและช่วยเร่งการก่อตัว และส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดในช่วงแรกสูง

4.6.3 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ก. ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 0 (DRD_0) จะมีความหนาแน่นมากว่าคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (OPC) ประมาณร้อยละ 0.57 เนื่องจากการใส่สารผสมเพิ่ม Type A & F และเมื่อใส่ฝุ่นหินผุความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณฝุ่นหินผุที่เพิ่มขึ้น

ข. ค่ากำลังอัดของคอนกรีต

สารผสมเพิ่ม A & F ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.58 และคอนกรีตที่ใส่ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่ากำลังอัดลดลงตามปริมาณฝุ่นหินผุที่เพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดที่อายุ 1 และ 7 วัน จะมีการพัฒนากำลังอัดต่ำ แต่ที่อายุ 28 วัน จะมีการพัฒนากำลังอัดสูงทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะพัฒนามากขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น โดยที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินผุร้อยละ 15 และ 20 ไม่ผ่านตามเกณฑ์ที่ออกแบบ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ใช้ฝุ่นหินผุ

ผสมร้อยละ 10 มีค่าผ่านตามเกณฑ์ที่ออกแบบ ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 514 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จากการศึกษาใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้สารผสมเพิ่ม A & F 4.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 มีความเหมาะสมที่สุดในการศึกษาครั้งนี้

4.7 ข้อเสนอแนะ

1. ก่อนนำฝุ่นหินผุมาทดสอบ ก่อนการบดควรทำให้หินผุอยู่ในสภาพแห้งหรือมีความชื้นน้อยที่สุด เพื่อสะดวกในการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325

2. ควรศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่อายุมากกว่านี้ เช่น 56 และ 90 วัน เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของปฏิกิริยาปอซโซลาน

3. ควรศึกษาหินผุจากหลายๆ แหล่ง เพื่อเปรียบเทียบ และพิจารณาแนวทางเลือกในการใช้หินผุในงานคอนกรีต

ภาคผนวก

ผลลัพธ์ (OUTPUT) ที่ได้จากโครงการวิจัย

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.)
Thailand Concrete Association (TCA)
ชั้น 3 อาคารอัมพาลิมวิศวอินทรมหาวิทยาลัยแห่งประเทศไทย 487 ซอยสำนัก 39 (ซอยเพชรบุรี 31)
ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10310
โทร : 0-2935-6593, โทรสาร : 0-2935-6538Email : thaitca@gmail.com http://www.thaitca.or.th

25 มกราคม 2560

เรื่อง ตอบรับบทความฉบับสมบูรณ์ MAT-001
เรียน คุณชูเกียรติ ชูสกุล
คุณขวัญชีวา หงษสตาร์

ด้วยสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดำเนินการจัด ***"การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12" (The Annual Concrete Conference ACC12)*** ขึ้นระหว่าง ***วันที่ 15-17 กุมภาพันธ์ 2560 ณ โรงแรม The Regent Cha-am Beach Resort*** โดยการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12 มีวัตถุประสงค์เพื่อเปิดโอกาสให้วิศวกร และบุคคลทั่วไปทั้งภาครัฐและเอกชนได้แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และเสนอผลงานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านคอนกรีตวัสดุทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ พร้อมยกระดับฐานะงานวิจัย บทความทางวิชาการ และเทคโนโลยีทางด้านคอนกรีตวัสดุ ให้มีความทัดเทียมกับนานาชาติ

ซึ่งจากการที่ท่าน ได้ให้ความสนใจส่งบทความวิชาการ เรื่อง ***"คอนกรีตกำลังสูงผสมฝุ่นหินฝุHigh Strength Concrete Using Decomposed-Rock Dust"*** เพื่อเข้าร่วมเสนอบทความในการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 12 นั้น ซึ่งคณะกรรมการจัดการประชุม ได้พิจารณาแล้วเห็นสมควรให้นำเสนอบทความวิจัยของท่านเข้าร่วมในการประชุมวิชาการครั้งนี้ โดยทางสมาคมฯ จะแจ้งกำหนดการและรายละเอียดอื่น ๆ ให้ทราบทาง Website ของสมาคมฯ ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อทราบ และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)
นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

คอนกรีตกำลังสูงผสมฝุ่นหินผุ

High Strength Concrete Using Decomposed-Stone Dust

ชูเกียรติ ชูสกุล[1] **(Chookiat Choosakul)[1]**
ขวัญชีวา หยงสตาร์[2] **(Khwanchiwa Yongsata)[2]**

[1]*อาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*
chookiat56@yahoo.com
[2]*อาจารย์สาขาเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*
arjanpla@hotmail.com

บทคัดย่อ : การศึกษาการนำฝุ่นหินผุเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในงานคอนกรีตกำลังสูง เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.36 และออกแบบค่ากำลังอัดที่ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผสมฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้สารผสมเพิ่ม Type A&F ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการเทได้จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณฝุ่นหินผุที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด การทดแทนที่ฝุ่นหินผุเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง แสดงให้เห็นว่าการใช้ฝุ่นหินผุในงานคอนกรีตกำลังสูงจะทำให้น้ำหนักของคอนกรีตต่ำ

ABSTRACT: Study on the use of decomposed-rock dust substitution for Portland cement type 1 in high strength concrete on the compressive strength was tested. The ratio of water to binder (W/B) was 0.36 with the compression design at 500 kg/cm^2. Decomposed-rock dust was replaced at 10%, 15%, and 20% by the weight of the binder and the admixtures Type A&F was added. The compressive strength was tested at 1, 7 and 28 days. The result revealed that the workability was increased with increasing the proportion of decomposed-rock dust. The highest compressive strength was found at 10% replacement rate. Increasing the substitution rate of decomposed-rock dust was decreased the concrete density. The result indicated that low concrete weight of high strength concrete in high substitution rate of decomposed-rock dust.

KEYWORDS: High Strength Concrete, Decomposed-Rock Dust, Compressive Strength, Natural Pozzolan

1. รายละเอียดทั่วไป

จากปัญหางานก่อสร้างที่พบกันมากในปัจจุบันคือ การประสบกับปัญหาในด้านราคาของวัสดุแพงมาก งานคอนกรีตกำลังสูงจึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เพื่อจะช่วยลดในด้านวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างให้น้อยลงไป แต่ยังคงรักษาคุณภาพของงานไว้ เช่น งานก่อสร้างสะพาน งานก่อสร้างอาคาร งานก่อสร้างทางด่วน เป็นต้น เนื่องจากจะช่วยลดขนาดของขององค์อาคารหรือสิ่งก่อสร้างนั้นลงไป แต่จะคงคุณภาพเดิมไว้ ตลอดจนน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้างจะลดน้ำหนักลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้คอนกรีตกำลังสูงยังมีคุณสมบัติเนื้อแน่น จึงทำให้มีความคงทนสูง มีประสิทธิภาพในการรับกำลังอัดได้มากกว่าคอนกรีตโดยทั่วไป ในการทำงานก็สามารถถอดแบบหล่อของคอนกรีตได้เร็ว มีกำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงเฉือน และโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ซึ่งจะให้เกิดการหดตัวน้อยลงไป โดยทั่วไปแล้วถ้าเป็นคอนกรีตคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าการยุบตัวที่น้อยมากๆ หรือว่าอาจไม่มีการยุบตัวเกิดขึ้นเลย (No Slum Concrete)

คอนกรีตกำลังสูงในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปเป็นอย่างมาก มีการใช้สารเคมีต่างๆในการผสมเพิ่มในคอนกรีต เช่น สารลดปริมาณน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษ (super plasticizer) สารเร่งเร่งการก่อตัว (accelerating admixtures) โดยสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงและทำให้ความสามารถในการเทคอนกรีตมีประสิทธิภาพมากขึ้น การใช้สารผสมเพิ่มจะทำให้คอนกรีตมีคุณภาพมากขึ้น กำลังสูงขึ้นปริมาณการใช้น้ำ

ลดลง การใช้วัสดุปอซโซลานจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและให้คงทนของคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นอีกด้วย [1]

หินผุเป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่พบในแหล่งที่มีหินภูเขาไฟ หินแกรนิต เฟลดสปาร์ หรือในแหล่งดินขาว ประเทศไทยพบหินผุอยู่หลายแหล่ง แต่แหล่งที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ได้แก่ ลำปาง ลพบุรี กาญจนบุรี และเพชรบุรี มีชื่อทางการค้าว่า พอตเตอรีสโตน (Pottery Stone) โดยปกติโครงสร้างทางแร่ของหินผุจะประกอบด้วยควอร์ตซและ ไมกา (White Mica ; $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$) เป็นหลัก ควอร์ตซจะทนไฟสูง ไม่มีความเหนียว และไม่มีความสามารถในการหลอม ส่วนไมกาจะมีสมบัติคล้ายดินขาว คือมีความเหนียว ทำให้สภาพการไหลตัวดีขึ้น หินผุมีจุดหลอมละลายประมาณ 1150 - 1300 องศาเซลเซียส หินผุเป็นแร่ที่ให้ซิลิกา อลูมินา และโปแตส ในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีองค์ประกอบทางเคมีในโครงสร้างดังตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในโครงสร้างของหินผุ [2]

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ลำปาง	ลพบุรี
SiO_2	76.61	75.88
Al_2O_3	13.09	11.69
Fe_2O_3	0.35	0.81
MgO	0.01	<0.01
CaO	0.15	0.20
Na_2O	5.20	3.67
K_2O	1.59	4.74
TiO_2	0.05	0.13
P_2O_5	<0.01	<0.01
MnO_2	0.02	0.01
Cr_2O_5	0.01	<0.01
LOI	3.92	3.67

ฝุ่นหินผุได้มาจากการนำหินมาบดให้ละเอียดซึ่งจะมีคุณสมบัติที่มีสารปอซโซลาน [3] ซึ่งจากการสำรวจบ่อหินผุในอำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี พบว่ามีบ่อหินผุอยู่หลายแห่ง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการนำฝุ่นหินผุมาทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลงในสัดส่วนที่พอเหมาะ เพื่อจะเป็นแนวทางในการพิจารณาใช้ฝุ่นหินผุที่ได้บดละเอียดแล้วทำให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีตามความต้องการที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตให้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่จะใช้งานต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยนำฝุ่นหินผุจากแหล่งบ่อในพื้นที่ อำเภอดอนสัก จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยนำมาบดให้ละเอียดและนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ใช้หินขนาด 3/8 นิ้ว มีค่า ถพ. 2.77 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.49 และหน่วยน้ำหนัก 1512 กก/ม^3 ทรายหยาบ ค่า ถพ. 2.60 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.58 และค่าโมดูลัสความละเอียด (FM.) 3.15 และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม SIKAMENT FF มีคุณสมบัติเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C 494-81 Type A&F สารลดน้ำและสารลดน้ำพิเศษ ในอัตราส่วนร้อยละ 0.75 ของน้ำหนักวัสดุประสาน

2. ส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.4R-08 [4] กำหนดกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน (fc') เท่ากับ 500 กก/ซม^2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.36 เติมสารลดน้ำพิเศษ Type A&F ในอัตราร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตคสบคุมเท่ากับ 5-10 ซม. ส่วนคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควบคุมอัตราส่วนผสมเหมือนคอนกรีตควบคุม โดยไม่ควบคุมค่าการยุบตัว และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นหินผุในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

สัญลักษณ์	ความหมาย
OPC	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
DSD10	ปูนซีเมนต์ทดแทนด้วยฝุ่นหินผุร้อยละ 10
Sp	สารลดน้ำพิเศษ
DSD	ฝุ่นหินผุ

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีต

Mix	Mix Proportion (kg/m^3)					
	Cement	DSD	Sand	Stone	Water	Sp
OPC	509	0	1093	620	183	4
DSD10	458	51	1093	620	183	4
DSD15	432	77	1093	620	183	4
DSD20	407	102	1093	620	183	4

3. ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินผุ โดยทำการทดสอบดังนี้

1) ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินผุ โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical Formulas “Fundamental Parameter Calculations” ซึ่งปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูปออกไซด์ ของธาตุนั้นๆ

2) ศึกษารูปร่างและลักษณะของอนุภาคฝุ่นหินผุ โดยถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM: JEOLรุ่น JSM-5410LN)

3) ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C188 [4]

4) ทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C39 [5] ที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

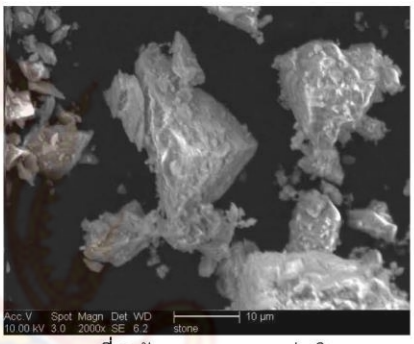
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินผุ

ภาพที่ 1 ลักษณะสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, หินผุก่อนที่จะนำมาบดและหินผุที่บดเป็นฝุ่นหินผุแล้ว

ฝุ่นหินผุที่นำมาบดละเอียดมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.85 ฝุ่นหินผุ จะมีลักษณะเป็น สีขาว ซึ่งจะแตกต่างจากสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อน

รูปร่างลักษณะของอนุภาคของฝุ่นหินผุ เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายขยายโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope แสดงในภาพที่ 2 พบว่าอนุภาค ฝุ่นหินผุมีรูปร่างลักษณะส่วนใหญ่เป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน ขนาดอนุภาคระหว่าง 2-35 ไมโครเมตร ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระและตัน



ภาพที่ 2 ลักษณะอนุภาคของฝุ่นหินผุ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินผุ

Chemical Composition (%)	Portland Cement	Decomposed -rock dust	ASTM C618-99 Class N
SiO_2	20.62	36.07	
Al_2O_3	5.22	19.86	70
Fe_2O_3	3.10	13.67	
SO_3	2.70	3.29	4
MgO	0.91	2.47	5
Na_2O	0.07	1.31	1.5
K_2O	0.50	2.12	-
CaO	64.99	16.78	-
P_2O_5	-	0.21	-
LOI	1.13	5.80	10

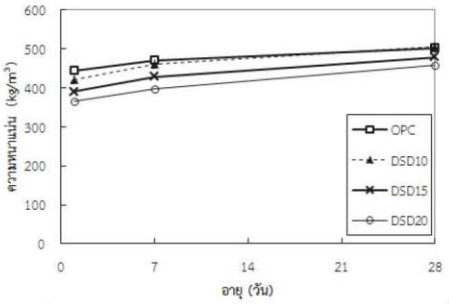
องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินผุจากตารางที่ 4 พบว่ามีปริมาณของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 36.07, 19.86 และ 13.67 ตามลำดับ เมื่อรวมปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 69.60 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 70 ค่า LOI น้อยกว่า 10 ค่า SO_3 น้อยกว่าร้อยละ 4 ดังนั้นฝุ่นหินผุจึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618-99 [5] ซึ่งเป็นสารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ฝุ่นหินผุมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ [8] สำหรับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่าเท่ากับร้อยละ 16.78 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (64.99) ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในการรับกำลังอัดของคอนกรีต คือกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ของวัสดุปอซโซลานนั้น โดยวัสดุที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าจะได้กำลังอัดมากกว่าด้วย [9]

2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

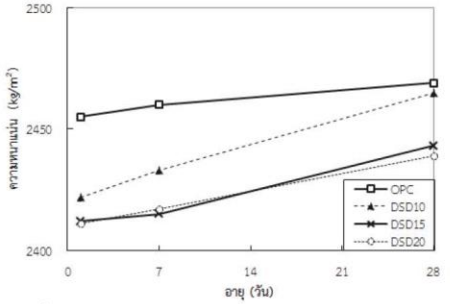
จากตารางที่ 5 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของฝุ่นหินผุที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10, 15 และ 20 มีค่าการยุบตัวเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม (OPC) คิดเป็นร้อยละ 260, 320 และ 380 ตามลำดับ และการใช้ฝุ่นหินผุมีส่วนทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้มากขึ้น ในส่วนของกำลังรับแรงอัด คอนกรีตที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 15 สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีเมื่อมีอายุ 7 วัน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน [1] ดังภาพที่ 3 โดยค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินผุทุกอัตราส่วนจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 1 และ 7 วัน แต่ที่ 28 วัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 จะมีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นช้า และทำให้กำลังอัดในช่วงแรกต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [10] ส่วนการทดแทนที่ร้อยละ 15 และ 20 พบว่ามีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากการแทนที่มากเกินไปทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์น้อยลง ทำให้เกิด C-S-H และ $Ca(OH)_2$ น้อยจนไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน [11] เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน คอนกรีตผสมฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกอัตราส่วนของการทดแทนถือเป็นคอนกรีตกำลังสูง คือมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 504, 478 และ 459 กก/ซม^2 คิดเป็นร้อยละ 100, 95 และ 91 ของคอนกรีตควบคุม เมื่อทดแทนฝุ่นหินผุที่อัตราร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ส่วนผสมมีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง ส่งผลให้สารประกอบทางเคมีที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตลดน้อยลง โดยเฉพาะในช่วงอายุต้นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานของฝุ่นหินผุเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีอัตราการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะพัฒนามากขึ้นเมื่ออายุของตัวอย่างมากขึ้น [8] โดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานมีค่ารับกำลังอัดสูงที่สุดและมีค่าสูงกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนด (fc') ส่วนคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 และ 20 มีค่าต่ำกว่าค่ากำลังอัดที่กำหนด (fc')

ตารางที่ 5 กำลังอัดและร้อยละของคอนกรีต

mix	Compressive strength (kg/m^2) (Normalized) (%)			Slump (cm)
	1-d	7-d	28-d	
OPC	444 (100)	470 (100)	502 (100)	5
DSD10	421 (94.8)	460 (97.9)	504 (100.4)	13
DSD15	390 (87.8)	428 (91.1)	478 (95.2)	16
DSD20	365 (82.2)	397 (84.5)	459 (91.4)	19



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอายุของคอนกรีต



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตกับอายุของคอนกรีต

3. ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

จากตารางที่ 6 คอนกรีตที่ใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีความหนาแน่นลดลง การผสมฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงตามอัตราส่วนร้อยละการทดแทน โดยมีค่าความหนาแน่นลดลงเป็นร้อยละ 99.8, 98.9 และ 98.8 ของคอนกรีตควบคุม เมื่อทดแทนฝุ่นหินผุที่อัตราร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากฝุ่นหินผุมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเมื่อมีการทดแทนฝุ่นหินผุเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลง [12]

ตารางที่ 6 ความหนาแน่นและร้อยละของคอนกรีต

mix	Density (kg/m^3) (Normalized) (%)		
	1-d	7-d	28-d
OPC	2455	2460	2469
	(100)	(100)	(100)
DSD10	2422	2433	2465
	(98.7)	(98.9)	(100.2)
DSD15	2412	2415	2443
	(98.2)	(98.2)	(99.3)
DSD20	2411	2417	2439
	(98.2)	(98.3)	(99.2)

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่าฝุ่นหินผุสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในงานคอนกรีตกำลังสูงได้ ซึ่งการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงจะทำให้ความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง และพบว่าการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกอัตราส่วนการทดแทนสามารถนำมาใช้งานคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยสัดส่วนการใช้ฝุ่นหินผุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยคอนกรีตกำลังสูงผสมฝุ่นหินผุ ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2556 และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และห้องทดสอบ และใคร่ขอบคุณ นายศุภวัฒน์ จันทร์ปราง และนายชรินทร์ นวลแก้ว ทีมงานวิจัยปฏิบัติการคอนกรีตที่ช่วยเก็บข้อมูลการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ปริญญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2552. ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สมาคมคอนกรีตไทย.

[2] บริษัท สินเขาถ้ำพัฒนกิจ จำกัด (2552). http://skpc.co.th/v2.2008/chemical_analysis.php

[3] ชูเกียรติ ชูสกุล, 2553. การศึกษาคุณสมบัติฝุ่นหินผุเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานก่อและฉาบ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, จังหวัดเพชรบุรี.

[4] American Concrete Institute, 2008. ACI 211.4R-08 : Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials: ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan.

[5] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C188-95 : Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Philadelphia, 179-180.

[6] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C39 : Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02 Philadelphia, 18-22.

[7] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-313.

[8] S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin., 2003. Concrete. 2nd edition. New Jersey : Prentice Hall.

[9] Hansen, T.C., 1990. Long-Term Strength of High Fly Ash Concrete. Cement and Concrete Research : Vol. 20, 193-196

[10] สมชาย อินทะตา, แสงทอง อินธิแสง และ เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์, 2553. กำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเมื่อใช้ FGD ยิปซัมแทนยิปซัมจากธรรมชาติในส่วนผสมปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, จังหวัดเพชรบุรี.

[11] สมชาย อินทะตา, ชัยชาญ โชติฉนอม และ เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์, 2550. การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, จังหวัดชลบุรี.

[12] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วัชรากร วงศ์คำจันทร์, 2544. พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ฉบับที่ 3 : 327-342.

บรรณานุกรม

กิติพงษ์ อำนาวเหนือ. 2552. การศึกษาคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชูเกียรติ ชูสกุล. 2553. การศึกษาคุณสมบัติฝุ่นหินผุเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานก่อและงานฉาบ, น. MAT 35. ใน การประชุมคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 , 20-22 ตุลาคม 2553 อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี.

ชูโชค ศิวะคุณากร. 2536. การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงด้วยการผสมเถ้าถ่านหิน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง. 2547. การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บริษัท สินเขาถ้ำพัฒนกิจ จำกัด 2552. ทำความรู้จักกับ “หินผุ”. *เข้าถึงได้จาก*: http://skpc.co.th/v2.2008/chemical_analysis.php : 25 กุมภาพันธ์ 2552.

ประเสริฐ ดำรงชัย. 2542. วัสดุก่อสร้าง. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, หน่วยสารบรรณ งานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สมาคมคอนกรีตไทย.

ปริญญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2552. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. : สำนักพิมพ์สมาคมคอนกรีตไทย.

พงศธร จันทร์ตรี. 2552. การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าชานอ้อย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เรื่องรุจดิ์ ชีรโรจน์. 2546. การพัฒนาเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วและเถ้าก้นเตาเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

American Concrete Institute, 2008. ACI 211.4R-08 : Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials: ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan. PA.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2001. Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates: C 29/C29M-97. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia. PA.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 1997. Standard Specification Concrete Aggregates: C 33-01. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia. PA.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2001. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate: C128-97. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia. PA.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2001. Standard Testing Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete: C143-90a. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia. PA.

American Society for Testing and Materials (ASTM) 2001. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement: C188-95. Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Philadelphia, pp. 179-180.

Balaguru, P., 2001. Properties of Normal and High-strength Concrete Containing Metakaolin. pp. 737- 756. In V.M.Malthotra ed. Fly Ash,Silica Fume, Slag & natural Pozzolans in Concrete, proceeding seventh CANMET/ACI International Conference. Bangkok.

Fray, A.L.A., Bijen, J.M., and De Haan, Y.M. (1989). “The reaction of Fly Ash in Concrete”, A Critical Examination. Cement and Concrete Research. 19 : 235-246.

Hansen, T.C. (1990). Long-Term Strength of Fly Ash Concrete. Cement and Concrete Research. 20 (2) : 193-196.